

MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULU

**KAUPALLISTEN KOMPONENTTIEN KÄYTTÖ TAKTISEN
TIEDUSTELULENNOKIN RAKENTAMISESSA**

Kandidaatintutkielma

Kadetti
Jalmari Paakala

Kadettikurssi 97
Maavoimien johtamisjärjestelmälinja

Maaliskuu 2013

MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULU

Kurssi	Linja	
Kadettikurssi 97	Maavoimien johtamisjärjestelmälinja	
Tekijä		
Kadetti Jalmari Paakala		
Tutkielman nimi		
Kaupallisten komponenttien käyttö taktisen tiedustelulennokin rakentamisessa		
Oppiaine, johon työ liittyy	Säilytyspaikka	
Sotatekniikka	Kurssikirjasto (MPKK:n kirjasto)	
Aika Maaliskuu 2013	Tekstisivuja 30	Liitesivuja 20
TIIVISTELMÄ		
<p>Miehittämättömät lavetit nähdään tärkeänä ja nopeasti kehittyvänä taistelukentän elementtinä. Sotilaallisista lähtökohdista suunnitellut miehittämättömät lennokkijärjestelmät ovat arvokkaita, ja puolustusteknologian hinta on edelleen ollut kasvussa. Kaupallisen teknologian hinta sen sijaan on laskenut samalla kun suorituskyky on noussut.</p> <p>Tämän tutkimuksen tarkoituksena on ollut selvittää, minkälaisia kaupallisesti saatavilla olevia miehittämättömässä lennokkijärjestelmässä käytettäviä komponentteja on olemassa. Tutkimuskysymykset alakysymyksineen ovat:</p> <ul style="list-style-type: none">• Minkälaisia taktisen tiedustelulennokin rakentamisessa hyödynnettävissä olevia komponentteja markkinoilla on?<ul style="list-style-type: none">○ Minkälaisia ovat taktisen tiedustelulennokin rakentamiseen hyödynnettäväksi soveltuvat komponentit?• Mikä on kaupallisista komponenteista kootun lennokin teoreettinen suorituskyky verrattuna olemassa olevien sotilaallisten järjestelmien suorituskykyihin?<ul style="list-style-type: none">○ Mikä on sotilaallisen lennokkijärjestelmän suorituskyky? <p>Työn mahdollistamiseksi on selvitetty tärkeimpiä vaatimuksia komponenteille sekä valmiille järjestelmille tekstianalyysillä aiemman tutkimuksen pohjalta. Vaatimuksiksi osoittautuivat noin tunnin toiminta-aika, lennokin noin 60 kilometrin tuntivauhti, noin kymmenen kilometrin toimintasäde sekä kyky tuottaa yksinkertaista, mieluiten paikkatiedollista kuvamateriaalia. Myös valaistusolosuhteista ja ulkolämpötiloista aiheutuvia vaatimuksia tutkittiin.</p> <p>Itse komponenttien kartoitus on toteutettu lennokkiharrastajille tarkoitettuihin nettisivuihin tutustumalla. Kerätyn aineiston luotettavuuden arvioimiseksi toteutettiin koelento, jossa mi-</p>		

tattiin kaupallisen lennökkikokoonpanon massa ja sillä saavutettavaa lentoaikaa, -matkaa ja -vauhtia. Samalla tutkijalle on syntynyt käsitys siitä, mitä toimivan lennokkijärjestelmän rakentaminen kaupallisista komponenteista vaatii ilman aikaisempaa tietoa aiheesta.

Tutkimuksessa käsitellään vain kiinteäsiipisen, taktiseen tiedusteluun soveltuvan lennokin välttämättömiä komponentteja. Maa-aseman komponentit on rajattu työn ulkopuolelle tiedustelutiedon vastaanottamiseen tarkoitettua videovastaanotinta lukuun ottamatta.

Johtopäätöksinä todetaan, että markkinoilla on teoriassa taktisen tiedustelulennokin vaatimuksia vaihtelevasti täyttävän lennokin rakentamiseen vaadittavat COTS-komponentit, mutta käytännössä niiden hyödyntäminen autonomiseen toimintaan kykenevän lennokin rakentamisessa saattaa aiheuttaa arvaamattomia ongelmia, ja esimerkiksi elektronista taistelunkestävyyttä ei pystytty toteamaan. Tutkija sai laskeutumisen jälkeen analysoitavaa videokuvaa COTS-komponenteista kootulla lennokilla, mutta koelennon aikainen tiikusade aiheutti sen, että videokuva ei ollut tiedustelutarkoitukseen käyttökelpoista.

AVAINSANAT

UAV, COTS, Tiedustelulennokki, Lennokki, Valvontajärjestelmät, Kaupalliset komponentit, Miehittämätön ilma-alus.

KAUPALLISTEN KOMPONENTTIEN KÄYTTÖ TAKTISEN TIEDUSTELULENNOKIN RAKENTAMISESSA

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO.....	1
1.1	YLEISTÄ.....	1
1.2	TUTKIMUSKYSYMYKSET JA TUTKIMUKSEN TAVOITTEET	2
1.3	TUTKIMUSMENETELMÄ.....	3
1.4	RAJAUS	3
1.5	KÄSITTEITÄ JA LYHENTEITÄ	4
2	TAKTISEN TIEDUSTELULENNOKKIJÄRJESTELMÄN VAATIMUKSET.....	6
2.1	TEKNINEN SUORITUSKYKY	6
2.2	YMPÄRISTÖN ASETTAMAT VAATIMUKSET	6
2.3	TAISTELUNKESTÄVYYS	8
3	SUORITUSKYKYREFERENSSEJÄ	9
3.1	AERONAUTICS ORBITER.....	9
3.2	PATRIA MASS	9
3.3	AEROVIRONMENT RQ-14 DRAGON EYE.....	10
4	LENNOKKIJÄRJESTELMÄN KOMPONENTIT.....	11
4.1	MOOTTORI JA ENERGIALÄHDE.....	11
4.2	RUNKO.....	13
4.3	OHJAUSJÄRJESTELMÄ	17
4.4	SENSORIT JA TIEDONSIIRTO	20
4.5	LENNOKIN MUUT JA MAA-ASEMAN KOMPONENTIT	22
5	KOELENTO	23
5.1	YLEISTÄ.....	23
5.2	TULOKSET.....	24
6	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	26

LÄHTEET

LIITTEET

KAUPALLISTEN KOMPONENTTIEN KÄYTTÖ TAKTISEN TIEDUSTELULENNOKIN RAKENTAMISESSA

1 JOHDANTO

1.1 Yleistä

Puolustusministeri Carl Haglundin mukaan ”Miehittämättömät lavetit ovat yksi nopeimmin kehittyvä tekninen ala sotilaallisten suorituskykyjen osalta. Niiden sotilastekninen kehitys tulee ottaa huomioon omien suorituskykyjemme kehittämismahdollisuuksia arvioitaessa, mutta yhtä lailla meidän on arvioitava niiden muodostamaa uhkaa omalle puolustuksellemme sotilaallisissa kriiseissä.” [28]

Kaupallisen teknologian hinta on alentunut ja suorituskyky noussut samalla, kun puolustusteknologian hinta on jatkuvasti noussut. Reservin koon pienentyessä ja muun muassa jalkaväkimiinojen käytöstä luovuttaessa menetettyä suorituskykyä pyritään korvaamaan muun muassa valvontajärjestelmiä kehittämällä [26, s. 1].

Kenen tahansa hankittavissa olevia komponentteja ja järjestelmiä voidaan mahdollisesti kohdata myös tilanteissa, joissa Puolustusvoimat on läsnä rauhanturvatehtävissä. Jo vuonna 2004 on arvioitu terroristien tai kapinallisjoukkojen käytössä olevan pienen miehittämättömän ilma-aluksen voivan aiheuttaa turvallisuusuhkia [49]. Kaupallisen teknologian taso antaa myös viitteen sotilaallisten, tarkoitukseen erityisesti suunniteltujen järjestelmien vähimmäissuorituskyvystä. Kaupallisten tuotteiden haasteita voivat olla käyttöikä, luotettavuus ja huoltovarmuus. [10]

Harrastajille tarkoitettujen lennökkikomponenttien käyttöä erilaisessa ilmakehän kuvauksikäytössä on tutkittu ulkomailla ja Suomessakin siviiliyhteiskunnan tarpeiden näkökulmasta ainakin Rovaniemen ammattikorkeakoulussa Jaska Ojalan ja Kimmo Juusolan opinnäytetöissä ”Miehittämättömien ilma-alusten käyttö ilmakehän kuvauksessa” ja ”Miehittämättömän helikopterin käyttö ilmakehän kuvauksessa”. Kaupallisten tuotteiden käyttöä on Maanpuolustuskorkeakoulussa tutkinut

ainakin Mika Kärämä EUK-tutkielmassaan ”Kaupallisten tuotteiden käyttäminen taistelukentän valvontajärjestelminä”, jossa on muun muassa eritelty suomalaisen taistelukentän asettamia vaatimuksia kaupallisille järjestelmille.

1.2 Tutkimuskysymykset ja tutkimuksen tavoitteet

Tämän tutkimuksen pää tutkimuskysymykset alakysymyksineen ovat:

- Minkälaisia taktisen tiedustelulennokin rakentamisessa hyödynnettävissä olevia komponentteja markkinoilla on?
 - Minkälaisia ovat taktisen tiedustelulennokin rakentamiseen hyödynnettäväksi soveltuvat komponentit?
- Mikä on kaupallisista komponenteista kootun lennokin teoreettinen suorituskyky verrattuna käytössä olevien sotilaallisten järjestelmien suorituskykyihin?
 - Mikä on sotilaallisen lennokijärjestelmän suorituskyky?

Tutkimuksen tavoitteena on koota teoriassa toimivia vaihtoehtoja sotilaallisille järjestelmille. Tavoitteen mukainen vaihtoehtolennokki on edullinen, rakenteeltaan yksinkertainen, helppo ja nopea saada ilmaan ja se tuottaa yksinkertaista visuaalista dataa taistelukentästä, joka tukee päällikön tai komentajan päätöksentekoprosessia.

Lähtökohta oletus on, että edullisuus tarkoittaa toimintavalmiin järjestelmän muutaman tuhannen euron hankintahintaa. Kehittyneet sensorit tai maa-aseman osat voivat nostaa järjestelmän hinnan noin kymmeneentuhanteen euroon, mutta suurimmassa tuhoutumisvaarassa olevien itse lennokin sekä päivänvalokameran tulee olla huomattavasti edullisempia. Yksinkertainen rakenne tarkoittaa tarvittaessa taistelukentällä korjattavissa olevaa rakennetta. Helppo ja nopea ilmaan saattaminen toteutuu, kun lennokki on lähetettävissä lentoon heittämällä tai korkeintaan lihasvoimin kuljetettavissa ja jännitettävissä olevalla katapultilla. Yksinkertainen visuaalinen data tarkoittaa käytännössä videokuvaa, joka lähetetään radiolinkillä reaaliaikaisena läheteenä lennokista.

Kartoitettavista tuotteista ja komponenteista pyritään selvittämään ainakin toiminta-aika ja -säde, käyttölämpötila, sensorien erottelukyky sekä hankintahinta. Valmiin, operatiivisesti käyttökelpoisen järjestelmän toimintakuntoon saattamiseksi mahdollisesti tarvittavien ostopalveluiden määrän ja hinnan arviointi ei tässä tutkimuksessa käytettävän aineiston perusteella ole luotettavasti mahdollista, kustannusten arvioinnin painopiste on siksi komponenttien hankintahinnoissa.

1.3 Tutkimusmenetelmä

Tutkimus toteutetaan menetelmätriangulaationa. Lennokkijärjestelmälle asetettavat vaatimukset sekä esiteltävät suorituskykyreferenssit perustuvat aikaisempaan tutkimukseen sekä valmistajien tarjoamaan tietoon järjestelmistään, joihin perehdytään tekstianalyysin keinoin. Näin selvitetään, *minkälaisia* ovat taktisen tiedustelulennokin rakentamiseen hyödynnettäväksi soveltuvat komponentit ja *mikä* on sotilaallisten lennokkijärjestelmien suorituskyky keskimäärin. Lennokkijärjestelmässä vaadittavat komponentit päätellään suorituskykyvaatimusten ja referenssien perusteella. Yhdestä referenssijärjestelmästä selvitettiin tarvittavia komponentteja sekä komponenttikohtaisia ominaisuuksia, mutta tiedon turvaluokituksen takia sitä ei voida käyttää julkisessa työssä.

Markkinoilla olevia erilaisia tutkimukseen soveltuvia kaupallisia komponentteja analysoidaan lennokkiharrastajille tarkoitetuilla internet-sivustoilla esitettyjä tietoja kartoittamalla ja vertaamalla. Tietojen luotettavuutta ja sovellettavuutta käytäntöön arvioidaan toteuttamalla koe-lento, joka on dokumentoitu tutkimuksen luvussa 5. Kokeessa mitattavia suureita ovat lennokin tehonkulutus, massa, toiminta-aika, lentovauhti sekä niiden tulona saavutettava lentomatkä. Samalla selvitetään edelleen, mitä komponentteja ja toimenpiteitä lennokin ilmaan saattamiseen tarvitaan. Näin saaduilla tiedoilla vastataan alkuperäisiin päätutkimuskysymyksiin.

1.4 Raja

Tutkimus koskee yksinkertaisia, pienikokoisia (korkeintaan noin 10 kilogrammaa painavia), aseistamattomia, taktiseen tiedusteluun Suomessa soveltuvia kiinteäsiipisiä lennokkeja, niiden lennonohjausjärjestelmiä sekä tärkeimpiä sensoreita. Tutkimuksen johtopäätöksissä verrataan toisiinsa valmiiksi tuotteistetun, sotilaallisista lähtökohdista suunnitellun miehittämättömän lennokkijärjestelmän lennokin ja kaupallisista komponenteista kootun taktiseen tiedusteluun soveltuvaksi arvioidun lennokin suorituskykyä. Jälkimmäisiäkin on yleisesti saatavilla eriasteisina tuotteistettuina kokonaisuuksina, mutta tällaisia valmiita, riittävän suorituskykyisiksi arvioituja järjestelmiä käytännössä markkinoidaan muun muassa sotilaalliseen käyttöön soveltuviksi, jolloin tutkimuksen haasteena olisi rajanveto kaupallisten ja sotilaallisten järjestelmien välille. Sotilaalliseen käyttöön soveltuvaksi markkinoitavat (MOTS-) järjestelmät ovat lähtökohtaisesti kalliita. Tässä tutkielmassa tutkitaan mahdollisimman edullisia vaihtoehtoisia (COTS-) ratkaisuja.

Puolustusvoimat on tehnyt vuonna 2012 sopimuksen israelilaisten Aeronautics Orbiter -taktisten lennokkien hankinnasta osana jalkaväkimiinojen suorituskyvyn korvaamista. Hankinta toteutettiin avoimien tieto- ja tarjouspyyntövaiheiden sekä niiden perusteella valittujen neljän järjestelmän kenttätestauksen pohjalta. [31] Näin ollen Puolustusvoimissa on jo selvitetty eri olemassa olevien täysin valmiiden sotilaalliseen käyttöön suunniteltujen miehittämättömien tiedustelulennokkijärjestelmien soveltuvuutta Suomen Puolustusvoimien käyttöön. Samantyyppisten kokonaisten järjestelmien kartoittaminen tässä tutkimuksessa käytettävissä olevilla resursseilla ei olisi mielekästä.

Tiedustelulennokkijärjestelmään kuuluvien maakomponenttien tarkastelu rajataan tiedustelutiedon vastaanottamiseen tarvittavaan vastaanottimeen. Ohjausohjelmiston käyttämiseen mahdollisesti tarvittavan tietokoneen, maa-aseman kotelointiin käytettävän salkun, antennien, tiedustelutiedon esittämiseen tarvittavien näyttöjen tai muiden vastaavien osakokonaisuuksien ominaisuuksiin ei oteta tutkimuksessa kantaa. Lennokin laukaisemiseen ja palauttamiseen mahdollisesti tarvittavia katapultteja, laskuvarjoja tai muita laitteita ja komponentteja ei tarkastella tässä tutkimuksessa.

1.5 Käsitteitä ja lyhenteitä

COTS eli commercial off-the-shelf tarkoittaa kaupallista, sellaisenaan käyttökelpoista tuotetta, ohjelmistoa tai komponenttia. Se on suunniteltu helposti käyttöönotettavaksi ja asennettavaksi ja toimimaan yhdessä järjestelmän muiden komponenttien kanssa ilman suuria modifikaatioita. COTS-tuotteen ominaispiirre on massavalmisteisuus ja sitä kautta suhteellisen edullinen hinta. Se asettuu vastakkain käsitteen military-off-the-shelf kanssa. [10]

EPO eli expanded polyalkene (myös expanded polyolefin) on paisutettua alkeenipolymeeriä. Käytetty alkeeni on yleensä polyeteeniä (PE) tai polypropeenaa (PP). Paisutettu polypropeeni (myös nimellä polypropyleeni) on paisutetun polystyreenin kaltainen, mutta huomattavasti sitkeämpi materiaali, jota käytetään muun muassa lennokeissa [11].

FPV eli first person view. Termiä käytetään lennokkiharrastuksesta, jossa lennätys perustuu radioteitse lennokista saatavaan videonäkymään erotuksena perinteiseen, näköyhteyden varassa tapahtuvaan lennätykseen. FPV-lennokki eroaa UAV:sta yleensä siten, että FPV-lennokkia lennetään tavallisen lennokin tapaan koko lennon ajan, kun UAV lentää pääsääntöisesti automatiikan varassa ohjelmoitua reittiä pitkin.

FLIR on lyhenne, joka tulee sanoista forward looking infrared ja tarkoittaa kuvaustekniikkaa, joka perustuu näkyvää valoa pitempialtoisen sähkömagneettisen säteilyn (lue: lämpösäteilyn) havaitsemiseen. Toiminta ei perustu havaittavien kohteiden heijastamaan vaan emittoimaan säteilyyn. Käytettäviä aallonpituusalueita on kaksi: 3–5 mikrometriä (keskipitkä alue) ja 8–12 mikrometriä (pitkä alue). Näillä aallonpituusalueilla ilman vesihöyry ja muut epäpuhtaudet, kuten savu, eivät estä sähkömagneettisen säteilyn etenemistä niin voimakkaasti, kuin näkyvän valon aallonpituusalueella, joten kuvaaminen onnistuu pitemmälle ja myös olosuhteissa, joissa se ei näkyvää valoa käyttävillä laitteilla onnistu. Termi ”forward looking” on peräisin ensimmäisistä tällaisista kameroista, jotka olivat suurikokoisia ja asennettu paikalleen lavettiin osoittamaan eteenpäin. [44] FLIR on myös lämpökameroita valmistavan yrityksen nimi.

MOTS eli military-off-the-shelf on tuote, joka on suunniteltu puhtaasti sotilaallisiin tarpeisiin. Se voi kuitenkin olla suunniteltu COTS-tuotteen pohjalta. [10]

Taistelukenttä tarkoittaa niitä olosuhteita, joille tässä tutkimuksessa tutkittavat järjestelmät voivat altistua, esimerkiksi pöly, kosteus, lämpötilanvaihtelut ja perinteinen ja elektroninen asevaikutus. Taistelukentällä vaikuttavat myös ne sää- ja valaistusolosuhteet, joissa tiedustelusensoreiden on toimittava.

Tiedustelu tarkoittaa omaan suunnitteluun ja toimintaan vaikuttavien seikkojen, erityisesti vihollista ja maastoa koskevien tietojen hankkimista, kokoamista, tulkintaa, arviointia ja tarvitsijoille toimittamista. [45]

UAV unmanned aerial vehicle (myös unmanned aircraft) eli miehittämätön ilma-alus. Mootto-roitu ilma-alus, jonka lentäjä ei ole laitteen kyydissä. Voi toimia itsenäisesti tai voidaan ohjata aktiivisesti maasta. Käyttää hyväkseen aerodynaamisia voimia pysyäksään ilmassa. Ballistiset ohjukset, risteilyohjukset tai tykistön ammukset eivät ole miehittämättömiä ilma-aluksia. [51]

UAS unmanned aircraft system sisältää miehittämättömän ilma-aluksen lisäksi kaikki sen toimintaan tarvittavat laitteet, verkkoyhteydet, maa-aseman sekä käyttäjähenkilöstön. [51]

Valvonta tarkoittaa sitä toimintaa, jota tutkittavilla järjestelmillä on tarkoitus suorittaa. Valvonnan tarkoituksena on havaita omia tai vihollisen ajoneuvoja, henkilöitä, ryhmyksiä tai niiden osia sekä määritellä edellä mainittujen paikka, liikesuunta ja -vauhti.

2 TAKTISEN TIEDUSTELULENNOKKIJÄRJESTELMÄN VAATIMUKSET

2.1 Tekninen suorituskyky

Lennokin on oltava riittävän suuri vakauden vuoksi, mutta kuitenkin kokonsa puolesta helposti kuljetettavissa. Koon kasvattamisen myötä lennokin havaitseminen ja siihen vaikuttaminen helpottuvat. Komppaniatason taktisen tiedustelulennokin on oltava helposti kuljetettava ja koottava, eikä sen käyttö saa vaatia suurta erityisosaamista. Sen on kyettävä autonomiseen toimintaan ilman operaattorin lennätystaitoa. Lento-ohjauksen toteuttaminen on yksinkertaisinta toteuttaa heittämällä ja palautukselle käytännössä ainoa mahdollisuus metsämaastossa on vertikaalinen laskeutuminen. [36] Lennokissa on näin käytännössä oltava laskuvarjo, tai sen on kestävä maahansyöksy.

Lennokin on kyettävä tiedustelemaan aluetta noin kymmenen kilometrin päässä laukaisupaikasta. Tällöin 60 kilometriä tunnissa suoraan kohti laukaisupaikkaa tuleva panssarivaunu on noin kymmenen minuutin päästä havaitsemisesta laukaisupaikalla. Kymmenen kilometrin vähimmäistoimintaetäisyys toteutuu myös monissa käytössä olevissa UAV-järjestelmissä. [36]

Toiminta-aikavaatimus on tunteja tai vähintään 60–90 minuuttia [36]. 60 kilometriä tunnissa etenevä lennokka pystyy tällöin lentämään toiminta-alueelleen kymmenen kilometrin päähän kymmenessä minuutissa, toimimaan siellä 40 minuuttia ja palaamaan vielä takaisin lähtöpaikkaan ennen toiminta-ajan päättymistä.

Tiedustelu-, taistelutilan hallinta-, etsintä-, ja pelastustehtäviin riittää pelkkä paikkatiedolla varustettu videokuva. Tulenjohtossa tarvittavien tietojen kerääminen onnistuu yksinkertaisimmillaan lentämällä suoraan kuvattavan kohteen yli, jolloin saadaan tarkat koordinaatit. [36] Lisäksi lennokka voidaan varustaa erilaisilla kemikaali-, säteily-, ja muilla vastaavilla tunnistimilla.

2.2 Ympäristön asettamat vaatimukset

Suomessa on vuorokaudessa kevätkausi (maaliskuu-, huhti-, toukokuu) valoisaa aikaa keskimäärin 15 tuntia, hämärää hieman yli yksi tunti ja pimeää hieman alle kahdeksan tuntia. Kesäkausi (kesä-, heinä-, elokuu) valoisaa on keskimäärin hieman alle 19 tuntia, hämärää vähän yli yksi tunti ja pimeää vähän alle neljä tuntia vuorokaudessa. Syyskausi (syys-, loka-, marraskuu) valoisaa on keskimäärin 10 tuntia, hämärää alle yksi tunti ja pi-

meää yli 13 tuntia vuorokaudessa ja talvikuukausina (joulu-, tammi-, helmikuussa) valoisaa on 6 tuntia, hämärää jälleen hieman yli tunti ja pimeää 17 tuntia vuorokaudessa. Mainittu hämärä alkaa auringon laskettua horisontin alapuolelle ja vaihtuu pimeydeksi, kun ulkona ei näe enää työskennellä ilman lisävalaistusta. [26]

Edellä mainittujen jakaumien perusteella vuoden aikana keskimäärin vuorokaudesta noin 50 % on valoisaa aikaa ja noin 40 % täysin pimeää. Näin ollen pelkkä päivänvalokamera on käyttökelpoinen puolet keskimääräisestä vuorokaudesta ja vastaavasti valon määrästä riippumaton sensori välttämätön noin 40 % keskimääräisestä vuorokaudesta. Jäljelle jäävän hämärän aikana, jota on vuoden aikana vuorokaudesta keskimäärin noin 10 %, voidaan tarvita tavallista valovoimaisempi kamera. Lähdeaineistona käytetyssä tutkimuksessa valon määrää on tarkasteltu auringon keskipisteen sijainnin mukaan, joten se ei huomioi kuun valoa.

Suomessa ulkokäytössä oleville laitteille asetettuja ylimpiä ja alimpia käyttölämpötiloja tarkasteltaessa merkitystä on käytännössä vain alimmilla käyttölämpötiloilla. Vuosina 1976–2010 kerätyn aineiston perusteella ulkolämpötila pysyy keskimäärin vuoden aikana jatkuvasti nollan yläpuolella Etelä-Suomessa (Helsinki) noin neljän kuukauden ajan, Keski-Suomessa (Jyväskylä) noin 2,5 kuukauden, Pohjois-Suomessa (Oulu) noin kolmen ja Lapissa (Sodankylä) noin kahden kuukauden ajan. [26] Helsingissä ulkolämpötila on siis jatkuvasti yli nolla celsiusastetta noin 33 % vuodesta, Jyväskylässä noin 20 %, Oulussa noin 25 % ja Sodankylässä noin 17 % vuodesta. Vastaavasti vuorokausia, jolloin ulkolämpötila on jatkuvasti nollan celsiusasteen alapuolella, on Helsingissä keskimäärin hieman yli 15 % vuodesta, Jyväskylässä noin 27 % ja Sodankylässä hieman alle 40 % [26].

Samalla tarkasteluajanjaksolla vuorokausia, joina ulkolämpötila on ainakin hetkellisesti laskenut alle -10 celsiusasteen, on Helsingissä ollut hieman alle kymmenen prosenttia, Jyväskylässä hieman yli 15 % ja Sodankylässä hieman alle 30 %. Vuorokausia, joina ulkolämpötila on jatkuvasti ollut alle -10 celsiusastetta, on Helsingissä ollut alle viisi prosenttia, Jyväskylässä noin viisi prosenttia ja Sodankylässä noin 12 %. [26]

Vuorokausia, jolloin ulkolämpötila on edes hetkellisesti laskenut alle -20 celsiusasteen, on Helsingissä ollut selvästi alle viisi prosenttia, Jyväskylässä hieman yli viisi prosenttia ja Sodankylässä noin 15 %. Lämpötila on pysynyt alle -20 celsiusasteessa Jyväskylässä noin yhtenä prosenttina vuorokausista ja Sodankylässäkin alle viitenä. Alle -30 celsiusasteen lämpötiloja

on edes hetkellisesti Helsingissä ja Jyväskylässä alle yhtenä prosenttina vuorokausista, mutta Sodankylässä vielä noin viitenä prosenttina vuorokausista. [26]

Huomataan, että Oulussa jatkuva yli nollan celsiusasteen ulkolämpötila kestää keskimäärin noin viisi prosenttiyksikköä kauemmin kuin Jyväskylässä, vaikka Oulu on selvästi pohjoisempaa. Todetaan siis, ettei keskimääräisiä ulkolämpötiloja voida arvioida suoraviivaisesti pelkän leveyspiirin perusteella. Voidaan kuitenkin todeta, että ollakseen varmuudella käyttökelpoinen vähintään 70 % vuodesta, Sodankylässä laitteiden on toimittava vielä noin -10 celsiusasteen lämpötilassa, kun Jyväskylässä riittää noin -5 celsiusasteen ja Helsingissä noin -1 celsiusasteen alin toimintalämpötila [26, s. 9]. Vastaavat lukemat 90 % käytettävyydellä ovat Sodankylässä noin -24 celsiusastetta, Jyväskylässä -16 celsiusastetta ja Helsingissä -9 celsiusastetta [26, s. 9].

2.3 Taistelunkestävyys

Lähtökohtaisesti taktiseen tiedustelulennokkijärjestelmään tulee kuulua useita lennokkeja, koska lennokka on järjestelmän suurimmassa tuhoutumisriskissä oleva osa. Lisäksi on aina pyrittävä käyttämään edullisempaa päivänvalokameraa kalliin pimeänäkökameran sijaan, kun päivänvalokameran suorituskyky voidaan odottaa riittäväksi tiedustelutehtävän toteuttamista varten. [36]

Elektronisen sodankäynnin keinoin muun muassa hankitaan sähkömagneettisen spektrin kautta tietoa taistelukentästä [25]. Lennokin ja maa-aseman välistä tiedonsiirtoa ajatellen vastustaja voi pyrkiä havaitsemaan lennokin lähetteen, mikä jo itsessään paljastaa tiedustelun lennokilla. Samoin, mikäli maa-asemasta joudutaan lähettämään ohjauskomentoja, voi se paljastua vastustajalle elektronisen sodankäynnin keinoin. Toisaalta passiiviset sensorit eivät pysty havaitsemaan lennokkia ja maa-asemaa, mikäli ne eivät säteile [25, s. 32], esimerkiksi jos lennokka lentää ennen lentoonlähtöä ohjelmoitua reittiä pitkin ja tallentaa tiedustelutiedon sisäiseen muistiinsa laskeutumisen jälkeen analysoitavaksi. Elektronista sodankäyntiä voidaan käyttää myös esimerkiksi lennokkijärjestelmän vastaanottimien häiritsemiseen, tai koko järjestelmän lamauttamiseen [25].

3 SUORITUSKYKYREFERENSSEJÄ

3.1 Aeronautics Orbiter

Aeronautics Orbiter -järjestelmiä hankitaan Puolustusvoimille 23,6 miljoonalla eurolla, sisältäen järjestelmän koulutuksen ja varaosia [31]. Tästä syystä järjestelmän suorituskykyä käytetään referenssinä tässä tutkimuksessa. Aeronautics Defense Systems on israelilainen puolustustarvikevalmistaja, joka suunnittelee muun muassa UAV-järjestelmiä sotilas- ja viranomaiskäyttöön [3].

Aeronautics Orbiter on kolmessa eri kokoluokassa saatava miehittämätön, taktiseen tiedusteluun soveltuva, sähkökäyttöinen, täysin valmis lennokkijärjestelmä (UAS). Se voidaan kuljettaa repussa tai autossa ja koota toimintavalmiiksi kymmenessä minuutissa. Se toimii täysin automaattisesti tehtävän saatuaan, mutta sitä voidaan ohjata myös manuaalisesti. Se osaa prosessoida havaitsemaansa kuvaa, ominaisuuksia ovat muun muassa stabilointi, digitaalinen suurennus ja liikkeen tunnistus. Orbiter kykenee toimimaan haastavissa sääolosuhteissa. Siinä on laskuvarjo pystysuoraa laskeutumista varten ja se voidaan laukaista katapultilla. [35]

Puolustusvoimien hankkiman keskikokoisen Orbiter II-järjestelmän lennokin siipien kärkiväli on kolme metriä. Sen suurin lentoonlähdomassa on 9,5 kilogrammaa. Lennokki kykenee toimimaan neljä tuntia laukaisusta. Se voidaan varustaa stabiloidulla ja optisella suurennoksella varustetulla päivänvalo- tai FLIR-kameralla. Sen maa-asema on varustettu automaattisesti alusta seuraavalla suuntaavalla antennilla, joka mahdollistaa 30 kilometrin toimintasäteen. [35]

3.2 Patria MASS

Patria on suomalainen puolustustarvikevalmistaja. Sen valmistaman tiedustelulennokkijärjestelmän Patria MASS:n arvioitiin muistuttavan teknisiltä perusratkaisuiltaan sekä ominaisuuksiltaan kaupallisista komponenteista koottua, testattua ja säädettyä tiedustelulennokkijärjestelmää, ja se on siksi mukana tässä tutkimuksessa referenssijärjestelmänä.

Patria MASS koostuu 1...3 sähkökäyttöisestä lennokista, kommunikointijärjestelmästä sekä salkkuun rakennetusta maa-asemasta. Sen massa tyhjänä on kolme kilogrammaa ja se voi kantaa puolen kilogramman hyötykuorman. Siipien kärkiväli on 1,5 metriä ja rungon pituus 1,05 metriä. Yksi lennokki kykenee operoimaan 60–75 minuuttia kerrallaan, optimilentovauhti on 60 kilometriä tunnissa. Sillä voidaan saavuttaa 10–20 kilometrin toimintaetäisyys. Se voidaan

varustaa muun muassa stabiloidulla päivä- tai yökameralla joiden osoitussuuntaa voidaan ohjata ylös, alas, vasemmalle ja oikealle maa-asemasta käsin. Kameran lisäksi saatavilla on säteilytunnistin ja taisteluainetunnistin päiväkameraan sekä säteilynäytteenotin. Lennokki kykenee tallentamaan lennon aikana keräämänsä datan, joten tiedonsiirron häiriöt eivät vaikuta tiedustelutietoon, kunhan lennokka saadaan palautettua. MASS on koottavissa ja purettavissa kahdeksassa minuutissa, ja kaksi ihmistä pystyy kuljettamaan koko järjestelmää, joka painaa alle 40 kilogrammaa. Yksi ihminen pystyy käyttämään järjestelmää, eikä häneltä vaadita lentotaitoa. [37]



Kuva 1: Patria MASS -järjestelmän lennokka ja maa-asema [37]

Kuvasta 1 päätellen MASS-järjestelmän lennokka on valmistettu paisutetusta muovista. Se on todennäköisesti alusta pitäen suunniteltu helposti koottavaksi ja purettavaksi. Maa-asema on koottu veden- ja iskunkestävältä näyttävään salkkuun. Ohjauskeskus on rakennettu kannettavan PC-tietokoneen ympärille.

3.3 AeroVironment RQ-14 Dragon Eye

AeroVironment RQ-14 Dragon Eye on repussa kannettava, sähkötoiminen UAV-järjestelmä. Yhdysvaltojen merijalkaväki käyttää sitä komppaniatasosta alaspäin tiedusteluun ja maailinosoitukseen, ja se on ollut operatiivisessa käytössä vuodesta 2003 alkaen. Näin se osoittaa alan kehityksen. Sen yhtäjaksoinen toiminta-aika on 45 minuuttia ja toimintaetäisyys hieman yli 4,5 kilometriä. [51] Järjestelmä koostuu kolmesta ilma-aluksesta, joita jokaista kohti on kaksi TV-kameraa ja yksi lämpökamera. Muut osat ovat kannettavan tietokoneen ympärille rakennettu maa-asema, kaksi datan vastaanottoasemaa sekä akkuja kahden tunnin operointia varten. [23] Hankintakustannuksiksi yhtä järjestelmää kohden arvioitiin vuonna 2006 hieman yli 120 000 euroa. [51]

4 LENNOKKIJÄRJESTELMÄN KOMPONENTIT

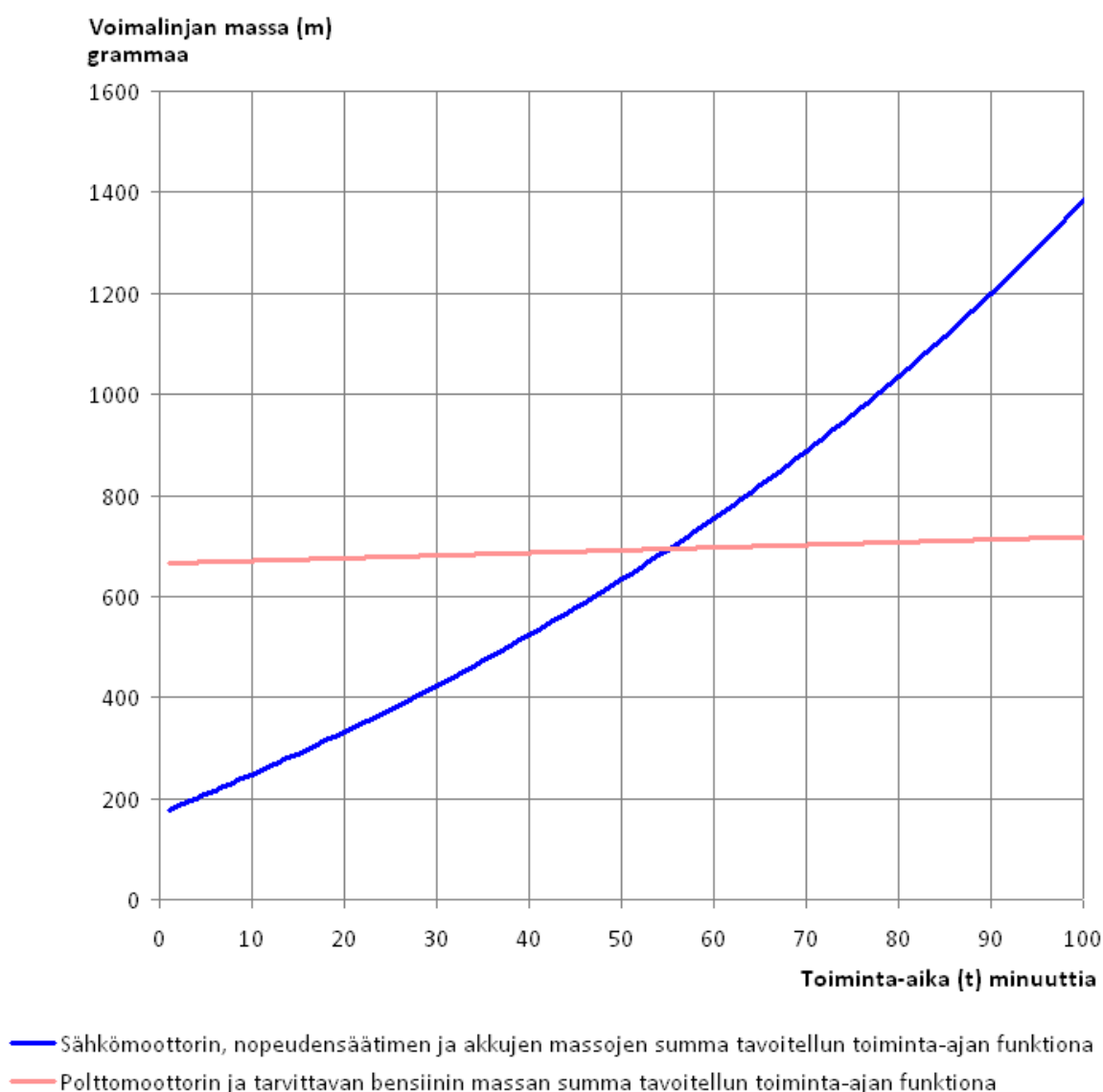
4.1 Moottori ja energialähde

Tutkimukseen on tarkasteltaviksi valittu kaksi energianlähdettä yleisyyden ja saatavuuden perusteella: sähkö ja bensiini. Tutkimuskysymyksiin vastaava komponenttien kartoitus on moottorin ja energianlähteen yksityiskohtien osalta toteutettu liitteessä 1, josta tutkimukseen on nostettu keskeisimmät tulokset. Kartoitus toteutettiin tutustumalla HobbyKing-verkkokaupan tuotevalikoimaan. Kartoitukseen valittiin kaksi sähkömoottoria, joiden teho riittää vähintään viidennessä luvussa dokumentoidulta koelennolta lasketun tehontarpeen tuottamiseen, sekä kaksi moottorin nopeudensäädintä, jotka pystyvät moottorien huipputehojen vaatimaan virransyöttöön. Akut valittiin nopeudensäätimille sopivien akkujännitteiden perusteella. Kapasiteettia ei pidetty kovinkaan merkityksellisenä, koska oletettiin, että akun hinta ja massa muuttuvat melko lineaarisesti kapasiteetin suhteen. Polttomoottoreita valittiin kaksi mahdollisimman kevyttä moottoria. Kartoitukseen lisättiin vielä kolmas saman kokoluokan polttomoottori Horizon Hobby -verkkokaupan valikoimasta, koska sille oli ilmoitettu keskimääräinen polttoaineenkulutus, mitä käytettiin kartoituksessa pienen kaksitahtipolttomoottorin yleisen hyötysuhteen arvioimiseksi.

Pääluvussa kolme esiteltyjen referenssien mukaan tyypillinen moottoriratkaisu pienikokoiseen taktista tiedustelua suorittavaan lennokkiin on sähkömoottori. Sähkömoottoreita löytyy kaikkialta ja ne ovat luotettavia sekä energiatehokkaita: hyvin suunniteltu ja huollettu sähkömoottori voi toimia yli 90 % hyötysuhteella [4]. Liitteessä 1 taulukoidut arvot osoittavat, että pelkkiä moottoreita vertailtaessa sähkömoottori on teho-massa-suhteeltaan selvästi polttomoottoria parempi. Kuitenkin, kun mukaan vertailuun otetaan sähkömoottorin energianlähde, eli akku, ja polttomoottorin energianlähde, eli bensiini, tilanne kääntyy sitä voimakkaammin polttomoottorin eduksi, mitä suurempi on energianlähteen osuus kokonaismassasta. Energianlähteen massa ja siten osuus kokonaismassasta kasvaa tavoiteltaessa pidempää toiminta-aikaa.

Kuvassa 2 esitetään sähkö- ja polttomoottorikäyttöisten propulsiojärjestelmien massat tavoitellun toiminta-ajan funktiona. Funktion muodostamisessa on käytetty hyväksi muun muassa sivulla 14 näkyvää siiven nostovoiman yhtälöä [27, s. 58] ja sitä, että suuri osa lentokoneen aerodynaamisesta vastuksesta kasvaa likimain nopeuden neliössä [27, s. 61]. Sen arvoon sisältyvät sähkömoottorin tapauksessa akun, nopeudensäätimen sekä sähkömoottorin massat. Polttomoottorin tapauksessa arvoon sisältyvät polttomoottorin sekä polttoaineen massat. Tarkat laskentaperusteet ja lähtöarvot on selvitetty liitteen 1 sivuilla 9–14 ja 18.

Kuvaajat (kuva 2) osoittavat, että akusta saatavalla sähkövirralla toimiva sähkömoottori on luvussa 5 dokumentoidun koelennon mittaustiedoista saaduilla lähtöarvoilla taktiseen tiedusteluun tarkoitetun lennokin voimanlähteeksi polttomoottoria kevyempi ratkaisu, mikäli ei tavoitella yli 55 minuutin toiminta-aikaa. Polttomoottorikokoonpanon massaetu pidemmällä toiminta-ajoilla johtuu bensiinin suuremmasta energiasisällöstä massayksikköä kohden, ja siten pienemmästä osuudesta järjestelmän kokonaismassaan akun vastaavaan verrattuna – toiminta-aikaa pidennettäessä bensiiniä täytyy lisätä massana mitattuna vähemmän kuin akkuja, joten myös lisääntyneestä lennokin massasta johtuva energiantarpeen kasvu on polttomoottorin tapauksessa vähäisempää kuin sähkökäyttöisessä kokoonpanossa [19, 47, 48]. Lisäksi polttoaineen massa – ja samalla koko lennokin ilmassa pitämiseen tarvittava energia – vähenee lennon jatkuessa kohti loppuaan. Tätä ei ole huomioitu kuvaajan muodostamiseen käytetyissä laskentaperusteissa.



Kuva 2: Sähkö- ja polttomoottorikäyttöisten voimalinjojen keskimääräiset massat tavoitellun toiminta-ajan funktiona

Kuvaajien y-akselin arvot x-akselin arvolla nolla osoittavat vain keskimääräisen moottorin massan (sähkö: 178 grammaa sis. nopeudensäädin, polttomoottori: 666 grammaa). Alkutilanteessa vertailtaessa kokonaisia lennokkeja ero voi olla suurempi sähkömoottorin hyväksi, sillä polttomoottorin kanssa voidaan joutua käyttämään raskasrakenteisempaa lennokkirunkoa muun muassa polttomoottorissa edestakaisin liikkuvien osien aiheuttamien värinöiden takia. Polttomoottorikäyttöisessä kokoonpanossa on lisäksi oltava ainakin polttoainetankki ja pieni akku tai generaattori moottorin sytytysvirtaa varten, mikä edelleen kasvattaa eroa sähkömoottorin hyväksi [1, 32, 39]. Tunnin toiminta-ajan kohdalla sähkökäyttöisen voimalinjan massa on kuvaajan mukaan noin 770 grammaa, eli akkujen osuus alkutilanteen massan vähentämisen jälkeen on noin 590 grammaa.

Liitteessä 1 dokumentoitujen sähkömoottoreiden verottomat hinnat ovat 17,39 euroa ja 14,65 euroa ja tehot 640 wattia ja 350 wattia. Moottoreiden ohjaamiseen tarvittavien nopeudensäätimien hinnat ovat 25,14 euroa ja 12,85 euroa. Komponentit toimivat akkujännitteillä 11,1–14,8 voltia. Kartoitetut akut maksavat 19,97 euroa ja 15,17 euroa. Kummankin kapasiteetti on 2,2 ampeerituntia, mutta kalliimman nimellisjännite on 14,8 voltia ja edullisemman 11,1 voltia, joten kapasiteetit tehon suhteen ovat 32,56 wattituntia ja 24,42 wattituntia. Akkujen massat ovat 257 grammaa ja 199 grammaa. Akun kapasiteetti keskimäärin massayksikköä kohti on 0,125 wattituntia / gramma, eli 7,48 wattiminuuttia / gramma, ja hinta 0,077 euroa / gramma, tai suhteessa kapasiteettiin 0,617 euroa / wattitunti. [20, 21, 33, 34, 47, 48,]

Yhteenvetona todettakoon, että lyhyehköllä, alle tunnin toiminta-ajalla sähkömoottorikäyttöinen lennokka on polttomoottorikäyttöistä lennokkia kevyempi. Tavoiteltaessa yli tunnin toiminta-aikaa bensiinin energiatiheys akkuun nähden massayksikköä kohti kääntää tilanteen polttomoottorin eduksi, mutta tällöin lennokista tulee tyhjänäkin painavampi, oletettavasti monimutkaisempi ja siten heikommin taktiseen tiedusteluun soveltuva. COTS-komponentteina sähkömoottorin ja nopeudensäätimen hinnaksi tulee aineiston perusteella 27,50–42,50 euroa. Tunnin toiminta-aikaan tarvitaan koelennon ja liitteen 1 perusteella keskimäärin noin 74 wattituntia energiaa, jolloin akkujen hinnaksi tulee noin 45 euroa ja koko voimalinjan hinnaksi noin 70–90 euroa.

4.2 Runko

Lennokin rungolla (eng. airframe) tarkoitetaan tässä tutkimuksessa sitä kokonaisuutta, johon moottori, ohjauslaitteet ja sensorit kiinnitetään. Suomen kielessä rungolla voidaan tarkoittaa

myös sitä lennokin tai lentokoneen osaa (eng. fuselage), johon siivet ja pyrstö kiinnittyvät. Siipien ja pyrstön erittely rungosta ei tässä tutkimuksessa ole tarpeellista, koska lennokkiaihiot käytännössä toimitetaan kaikkien kolmen rungon osan kokonaisuutena. Rungoista pyrittiin kartoittamaan massa, pituus, materiaali, hinta ja siipien kärkiväli. Kartoitus toteutettiin tutustumalla HobbyKing, FPV flying ja FPV Hobby -verkkokauppojen valikoimiin. Kartoitukseen valittiin lennokkirunkoja ensisijaisesti koon ja hinnan perusteella. Arvioitiin, että referenssi-järjestelmien suorituskyvyn saavuttamiseksi COTS-runkojen olisi oltava siiven kärkivälillä mitattuna suurin piirtein samaa kokoluokkaa.

Monet taktiseen tiedusteluun alun perin suunnitellut järjestelmät on rakennettu rungoiltaan lentävän siiven mallisiksi, esimerkiksi Aeronautics Orbiter. Perinteisen mallisessa lennokissa on tavanomaisen lentokoneen tapaan neljä ohjainpintaa: vasen ja oikea siiveke, sivuperäsin sekä korkeusperäsin. Sivu- sekä korkeusperäsin voidaan korvata V-peräsimellä, jolloin siivekkeitä ei välttämättä tarvita, mutta ne voidaan myös säilyttää, kuten esimerkiksi Patria MASS -järjestelmän lennokissa.

Siiven nostovoimaa kuvaa yhtälö

$$L = C_L(\alpha) \frac{1}{2} \rho V^2 S, \quad (1)$$

missä L = nostovoima, C_L = nostovoimakerroin, joka riippuu mm. siiven kohtauskulmasta α , ρ = väliaineen tiheys, V = vauhti ja S = siiven pinta-ala. [27, s. 58] Toisaalta keskimäärin noin 50 % lennokin etenemistä vastustavasta kokonaisvoimasta on kitkavoimaa, joka on verrannollinen lennokin vauhdin neliöön [27, s. 61]. Kitkavoima (leikkausvoima) on lisäksi suoraan verrannollinen siiven – ja koko lennokin – pinta-alaan [27, s. 25] Toinen merkittävä vastus syntyy nostovoiman tuottamisesta, ja sitä kuvaa yhtälö

$$D_i = k \left(\frac{L}{bV} \right)^2, \quad (2)$$

missä D_i = nostovoiman tuottamisesta aiheutuva vastus, k = kerroin, joka riippuu siiven muodosta ja ilman tiheydestä, L = nostovoima, b = siiven kärkiväli ja V = vauhti [27, s. 63]. Siiven nostovoimaa voidaan siis lisätä kasvattamalla kohtauskulmaa (tiettyyn rajaan asti), vauhtia tai siiven pinta-alaa. Vauhdin kasvattaminen lisää kitkavoimaa, mutta toisaalta vähentää nostovoiman tuottamisesta aiheutuvaa etenemistä vastustavaa voimaa. Siiven pinta-alan kasvattaminen lisää etenemistä vastustavaa kitkavoimaa lineaarisesti, mutta kärkivälin kasvattaminen pienentää nostovoiman tuottamisesta syntyvää vastusta neliöllisesti.

LANYU FPV RAPTOR

Lanyu FPV Raptor -lennokki (kuvassa 5) on kiinalaisen Shantou Lanyu Model Industrial Co., Ltd:n valmistama lennokka. Siitä on saatavilla kaksi erikokoista versiota (siiven kärkiväli 1,6 tai 2,0 metriä) ja neljä erilaista kokoonpanoa, joista yksinkertaisin sisältää pelkän rungon ja täydellisin moottorin, servojen ja nopeudensäätimen lisäksi akun, akkuvaraajan sekä ohjausjärjestelmän. [14]

Tähän tutkimukseen sopivimmaksi arvioituun kokoonpanoon kuuluvat lennokin rungon lisäksi ohjaamiseen tarvittavat servot, harjaton ulkopyörjämoottori ja siihen sopiva potkuri sekä moottorin nopeudensäädin. Moottori ja nopeudensäädin on varustettu yhteensopivilla liittimillä. Kokoonpanon (kärkiväli 1,6 metriä) hinta ilman arvonlisäveroa on noin 60 euroa. [15] Tällöin järjestelmä on käyttökelpoinen lisäämällä akku, sopiva ohjausjärjestelmä sekä tarvittavat sensorit ja niiden tiedonsiirtoon tarvittava yhteys.

Lennokin siivet ja pyrstö on valmistettu paisutetusta muovista (EPO) ja runko (fuselage) nailonin kaltaisesta muotoon puhalletusta muovista. Näin on saavutettu kevyt, mutta kohtalaisen jäykkä ja törmäyksiä kohtalaisesti kestävä rakenne. Lennokin kokoamiseen ei välttämättä tarvita erillisiä työkaluja tai liimaa, vaan kaikki osat kiinnittyvät ruuveilla, joiden vääntämiseen sopiva ristiurataltta kuuluu myyntipakkaukseen. [15]

Pakkauksen sisältöön tutustuttaessa selvisi, että servot on varustettu yleismallisella ”S”-liittimellä. Lisäksi lennokin mukana toimitettiin kallistussiivekeservoja varten Y-haarajohdin, jota käyttäen molempia kallistussiivekeservoja voidaan käyttää yhdellä ohjauskanavalla, kun servot asennetaan siipiin runkoon nähden akselinsa suunnassa poikittain, toistensa peilikuviksi.

SKYWALKER EPO

Skywalker EPO on Skywalker Technology Co., Ltd:n kokonaan paisutetusta muovista (EPO) valmistama lennokka, jonka siiven kärkiväli on 168 senttimetriä. Siivet ja runko on jäykistetty niiden sisällä kulkevalla hiilikuituputkella. Siipeä jäykistävän putken halkaisija on lennokin versiosta riippuen noin yhdeksän millimetriä ja seinämävahvuus 1,2 millimetriä. Lennokkia markkinoidaan erityisesti aloittelijoille ja FPV-lennätykseen sopivaksi. Kokoamiseen tarvittava liima kuuluu myyntipakkaukseen. [43, 52]

Lennokkia myydään ilman elektroniikkaa noin 80 euron hintaan [52], mutta se on saatavilla myös jälleenmyyjän valitseman moottorin, potkurin ja nopeudensäätimen kanssa noin 125 euron hintaan [43]. Hinnat eivät sisällä arvonlisäveroa.

SKYWALKER X8 WING

SKYWALKER X8 Wing (kuvassa 3) on Skywalker Technology Co., Ltd.:n lentävän siiven mallinen kokonaan EPO-vaahdosta valmistama lennokkirunko. Sen siiven kärkiväli on 2120 millimetriä ja se voi kantaa 1–2 kilogramman kuorman. Runko koostuu seitsemästä pääosasta, jotka kiinnitetään toisiinsa mukana toimitettavien vaneripalojen, hiilikuitutankojen ja liiman kanssa. Lennokin hinta ilman arvonlisäveroa on noin 130 euroa (valkoinen) tai 160 euroa (musta). Kaikki elektroniikka on hankittava erikseen. [9]



Kuva 3: Skywalker X8 Wing Black [9]

Kartoitettujen runkojen korkein veroton hinta on 160 euroa ja matalin 60 euroa ja hintojen keskiarvo 111 euroa. Siiven kärkiväli on keskimäärin 1,85 metriä ja kärkivälin vaihteluväli 52 senttimetriä. Huomionarvoista on, että edullisimman lennokin hintaan kuuluvat akkua ja vastaanotinta lukuun ottamatta kaikki lennokin ilmaan saattamiseksi välttämättömät, lennokkiin asennettavat komponentit. Muihin runkoihin on erikseen hankittava vähintään ohjausservot, ja Skywalker EPO:n kalliimpaa versiota lukuun ottamatta kaikkiin myös moottori, nopeudensäädin ja potkuri. Tällöin saatetaan törmätä yhteensopivuusongelmiin.

Yhteenvetona voidaan todeta, että kartoituksen perusteella markkinoilla on UAV-käyttöön referenssijärjestelmien lennokkeihin verrattuna kokonsa puolesta soveltuvia lennokkirunkoja.

Sen sijaan kuljetettavuus ja kokoonpantavuus taistelukentän olosuhteissa jäävät epäselviksi. Kartoitetut rungot on valmistettu osittain tai kokonaan paisutetusta muovista, joka on kevyttä, sitkeää ja kestää itsessään vettä ja pakkasta. Se ei kuitenkaan välttämättä suojaa rungon sisälle sijoitettavaa elektroniikkaa. Ainakin Lanyu FPV Raptor on myyntipakkauksen sisältöön käytännön tutustumisen perusteella koottavissa jopa taistelukentän olosuhteissa suoraan myyntipakkauksesta. Lentokuntoon saattamiseksi todellisuudessa tarvittavien, myyntipakkaukseen kuulumattomien tarvikkeiden todellista määrää ja välttämättömyyttä ei muiden runkojen osalta pystytä käytetyn aineiston perusteella luotettavasti toteamaan.

4.3 Ohjausjärjestelmä

Tutkimuksessa käsitellään ohjausjärjestelmän radiovastaanotinta ohjaussignaaleille, vakautus- ja lennonohjausjärjestelmää sekä siivekkeitä liikuttelevia servoja.

Servoteknisen järjestelmän tarkoitus on ohjata esimerkiksi kappaleen asema haluttuun arvoon, ja servojärjestelmässä oleellista on takaisinkytkentä, jonka avulla mitattua lähtösuuretta käytetään servojärjestelmän ohjaukseen. Mitatun lähtöarvon ja halutun arvon erotusta vahvistamalla voidaan nopeuttaa halutun arvon saavuttamista, mutta liian suuri erotuksen vahvistus aiheuttaa servojärjestelmässä värähtelyä, kun haluttu arvo ylitetään järjestelmän toimintojen hitauden vuoksi. Servojärjestelmän suorituskykyä mittaavia suureita ovat tarkkuus, voima, vauhti ja stabiilisuus. [13]

Lennokkiservojen toiminta perustuu pieneen sähkömoottoriin, joka on kytketty servon käyttöakseliin sopivan alennusvaihteiston kautta. Käyttöakseliin on kiinnitetty potentiometri, jonka vastus muuttuu käyttöakselin asennon muuttuessa. Servon sisälle rakennettu ohjauselektroniikka käyttää sähkömoottoria, joka pyörittää käyttöakselin haluttuun asentoon potentiometrin vastusarvon perusteella. Servot kytketään kolminapaisella johtimella lennokin ohjausjärjestelmään, tai jatkuvasti käsin ohjattavissa lennokeissa suoraan lennokin radiovastaanottimeen. Johtimen navat ovat järjestyksessä ohjaussignaali, käyttöjännite sekä maa. Käyttöjännitteen asettaminen keskimmäiseen napaan estää laiteauriot, mikäli liitin kytketään väärin päin. [22, 50]

Lennokkiservojen käyttöjännite on pääsääntöisesti noin viisi tai kuusi voltia, ja monet servot toimivat kummalla tahansa jännitteellä. Servon asentoa ohjataan ohjauspulssin pituutta muuttamalla. Pulssintoistotaajuus on yleisesti käytössä olevissa harrastelijaservojen

ohjauslaitteissa 50 hertsiä. Pulssin pituutta muutetaan esimerkiksi välillä 1–2 millisekuntia, jolloin servo on mekaanisessa keskiasennossaan 1,5 millisekunnin pulssilla ja ääriasennoissa yhden ja kahden millisekunnin pulssinpituuksilla. Pulssinpituuden ääriarvot voivat vaihdella hieman eri komponenttien kesken, mutta servo ohjataan keskikohtaansa käytännössä aina 1,5 millisekunnin pulssilla. [22, 42] Näin komponentit ovat keskenään vaihtokelpoisia.

Lennokkiservojen vääntövoima ilmoitetaan yleensä kykynä nostaa massaa yhden senttimetrin päässä käyttöakselista (kg/cm), eli noin newtonin kymmenyksinä. Vauhti ilmoitetaan yleensä aikana, joka kuluu käyttöakselin poikkeamiseen kuormittamattomana 60 astetta lähtöasennosta ja palaamiseen takaisin, ja on tyypillisesti luokkaa 100 millisekuntia. [22, 50]

Servodatabase.com listaa 25 suosittua lennokkiservoa, joista 22:lle on ilmoitettu hinta, joka on keskimäärin noin 28 euroa otoskeskihajonnalla 23 euroa. Näiden 22 servon massa on keskimäärin noin 40 grammaa otoskeskihajonnalla 16 grammaa. [38]

Servoja voidaan ohjata manuaalisesti, jolloin lennokin ohjaaminen vaatii lennättäjältä lennätystaitoa. Luvun 2 vaatimusten mukaan taktisen tiedustelulennokin on oltava käyttökelpoinen ilman operaattorin lennätystaitoa, joten servoja on ohjattava automaattisella lennonohjausjärjestelmällä. Google.com-hakukone löytää hakusanoilla ”rc plane autopilot” ainakin seuraavat kaksi muutaman sadan euron hintaista lennonohjausjärjestelmää:

FY-31AP FLIGHT STABILIZATION SYSTEM

Feiyu-Tech FY-31AP Flight Stabilization System on integroitu monen sensorin dataa käyttävä ohjausjärjestelmä. Siinä on kolmiakselinen gyro ja kiihtyvyysanturi, ilmanpaineanturi ja GPS-paikannin. Se voidaan asettaa vakauttamaan ja helpottamaan manuaalista lennätystä, pitämään lennokki tietyllä korkeudella tai lukittuna tiettyyn suuntaan, palauttamaan lennokki lähetyspaikalle, lennättämään lennokkia halkaisijaltaan ennalta asetettua ympyrää tai kulkemaan itsenäisesti ohjelmoitujen reittipisteiden kautta. Järjestelmään voidaan liittää FY-OSD-telemetriaosa, jolloin telemetria tiedot voidaan esittää suoraan analogisen videokuvan päällä. Järjestelmä maksaa telemetriaosan kanssa ilman veroja noin 230 euroa. [17, 18]

Kytettäessä päälle järjestelmä mittaa vallitsevan ilmanpaineen. Lukemaa käytetään vertailulukemana korkeustiedon muodostamista varten. GPS-paikannin mittaa lennokin paikan, ja lentoonlähdön jälkeen järjestelmä pitää lennokin halutussa lentotilassa inertia- ja kiihty-

vyysantureidensa dataa hyväksi käyttäen. Reittipisteet ja muut parametrit ohjelmoidaan maassa, mutta lentotilaa voidaan muuttaa koska tahansa. Reittipisteitä mahtuu muistiin kahdeksan kappaletta. Järjestelmään on mahdollista liittää dataradio, jonka kautta ohjelmointi voidaan toteuttaa lennon aikana tietokonepohjaisen käyttöliittymän kautta. Tällöin myös telemetriatiedot ovat käytettävissä tietokoneen kautta. [17, 18]

FY-31AP -järjestelmä painaa ilman telemetriaosaa 47 grammaa. Keskusyksikön käyttöjännite on 4,0–6,0 voltia ja sen virrankulutus viiden voltin jännitteellä on 50 milliampeeria. Sen koko on 47 x 27 x 20 millimetriä. Inertiasensori pystyy mittaamaan kiertymistä korkeintaan 2000 astetta sekunnissa. GPS-moduulin käyttöjännite on 3,0 - 3,3 voltia ja virrankulutus 3,3 voltin jännitteellä 60 milliampeeria. Sen koko on 32 x 32 x 20 millimetriä. Molempien käyttölämpötila on -25 celsiusasteesta 70 celsiusasteeseen. [17] Liitteen 1 perusteella todetaan, että tunnin toiminta-aika keskusyksikön ja GPS-moduulin yhdistetyllä tehontarpeella 500 milliwattia lisää noin 4 grammaa tarvittavaa akkumassaa, ja hintaa alle euron.

ARDUPILOT MEGA 2.5+

ArduPilot Mega on inertiamittaukseen perustuva autopilottijärjestelmä, joka on rakennettu avoimelle Arduino Mega -alustalle. Siinä on kolmiakselinen inertia- ja kiihtyvyysanturi, ilmanpaineanturi, magnetometri ja GPS. Se pystyy ohjaamaan lennokkien lisäksi myös lennokin kameragimbaalia ja yksi- ja moniroottorisia pyöriväsiipisiä lavetteja itsenäisesti käyttäjän määrittelemää reittiä pitkin. Myös ohjelmisto on toteutettu avoimella lähdekoodilla. ArduPilot Megaan pystyy tallentamaan satoja 3D-reittipisteitä ja se pystyy myös autonomiseen nousuun ja laskuun. Siinä on neljä megatavua muistia lennon telemetriatietojen tallentamista varten. [7]



Kuva 4: ArduPilot Mega 2.5+ [7]

Järjestelmän massasta tai ulkomitoista ei löytynyt tietoja, mutta piirilevyn mittojen [6] ja kuvan 4 perusteella sen ulkomitat ovat FY-31AP:n kanssa samaa suuruusluokkaa, ja siten masakin todennäköisesti melko yhtenevä. ArduPilot Mega 2.5+ maksaa verottomana noin 150 euroa [5].

Markkinoilla olevat edulliset autopilottijärjestelmät ovat ainakin teoriassa potentiaalisia ratkaisuja käytettäväksi taktisessa tiedustelulennokkijärjestelmässä. Ne kykenevät valmistajiensa mukaan autonomiseen toimintaan ja jopa autonomiseen laskeutumiseen kiitoradalle, mistä ei kuitenkaan kiitoradan puuttuessa ole hyötyä. Myös kameran ohjauskyky mainittiin, mikä mahdollistaa kameran vakautuksen, mikäli ohjausjärjestelmän sensorien dataa käytetään ohjauksessa hyväksi.

4.4 Sensorit ja tiedonsiirto

RD32II

RD32II on sylinterin muotoinen videokamera. Se pystyy tallentamaan 1920 x 1080 pisteen tarkkuuksista videota 30 ruutua sekunnissa ja 1280 x 720 pisteen tarkkuuksista videota asetuksista riippuen 30 tai 60 ruutua sekunnissa H.264-koodauksella. Koodausmenetelmäksi voidaan asetuksista valita PAL tai NTSC. Kennon tarkkuus riittää viiden megapikselin valokuvien ottamiseen JPEG-muodossa. Optiikan polttoväli on kolme millimetriä ja aukkosuhde 2,8. Linssin katselukulma on 120 astetta. Laitteessa on digitaalinen HDMI- ja analoginen komposiittivideoulostulo, jotka toimivat myös tallennuksen aikana. Tallennusmedia on microSD-kortti, jota tuetaan 32 gigatavun kapasiteettiin asti. Laitteen massa on 86 grammaa ja ulkomitat 91 x 41 x 36 millimetriä. Koteloinnin suojausluokka on IPX8, joka kuitenkin vaatii laitteen takaosan suojaamisen mukana tulevalle korkilla. Tällöin kameraan ei voida kytkeä kaapeleita esimerkiksi reaaliaikaista videokuvan siirtämistä varten. Laitteessa on sisäänrakennettu tuhannen milliampeeritunnin, 3,7 voltin jännitteellä toimiva litiumpolymeeriakku, joka riittää 2,5 tunnin yhtäjaksoiseen videon tallentamiseen. [41] Kameran veroton hinta on noin 90 euroa [40].

FLIR PATHFINDER LE 30Hz

FLIR Pathfinder LE 30Hz on 8–14 mikrometrin aallonpituudella toimiva FLIR-kamera. Sen jäädyttämättömän kennon resoluutio on 324 x 256 pikseliä ja lämpötilaerottelukyky sata mil-

likelviniä 25 celsiusasteen lämpötilassa. Spatiaalinen resoluutio on 2 milliradiaania. Videon formaatti on mallista riippuen PAL- tai NTSC-video, ja kamerassa on videon siirtämistä varten BNC-liitin. Käyttöjännite on 6–16 voltia tasajännitettä ja tehonkulutus korkeintaan 6 wattia, kun linssinlämmitin on päällä. Linssinlämmitin aktivoituu automaattisesti alle neljän celsiusasteen lämpötilassa, ja se pystyy sulattamaan kahden millimetrin jääkerroksen viidentoista minuutin kuluessa, kun ulkolämpötila on -30 celsiusastetta ja ympäröivän ilmvirran vauhti sata kilometriä tunnissa. Alin käyttölämpötila on -40 celsiusastetta. Hermeettisesti suljetun koteloinnin ulkomitat ovat 57,4 x 56,1 x 71,4 millimetriä, ja laitteen massa on 360 grammaa. Veroton hinta on noin 2000 euroa. [12] Tunnin toiminta-aika kuuden watin teholla lisää liitteessä 1 esitettyjen tietojen perusteella akkujen massaa noin 50 grammaa ja hintaa hieman alle neljä euroa.

BEV 1.3G 1500mW

BEV 1.3G 1500mW on yksinkertainen langaton videolähettimestä ja -vastaanottimesta koostuva järjestelmä. Se toimii 1,3 gigahertsin taajuudella ja lähettimen teho on 1500 milliwattia. Lähetin toimii 12 voltin jännitteellä ja kuluttaa virtaa 600 milliampeeria. Sen massa on 23 grammaa ilman antennia. Ilmoitettu alin käyttölämpötila on -10 celsiusastetta. Järjestelmä maksaa ilman veroja alle 80 euroa. Lähettimeen kytketään kamera komposiittivideokaapelilla sekä 12 voltin akku, ja vastaanottimesta saadaan video komposiittivideokaapelilla ulos. [8] Käyttöjännitteen ja virrankulutuksen tulo, eli tehonkulutus, on 7,2 wattia. Tunnin toiminta-aika 7,2 watin teholla lisää lennokin akkujen massaa liitteen 1 aineiston perusteella noin 60 grammaa ja hintaa noin 4,5 euroa.

Arvioidaan saavutettavaa yhteysväliä vapaan tilan vaimennuksen kaavalla

$$N = 10 \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2, \quad (3)$$

missä N = vaimennus desibeleinä, d = lähettimen ja vastaanottimen välinen etäisyys metreinä ja λ = signaalin aallonpituus metreinä. [16]

Tällöin esimerkiksi 1500 milliwatin, eli noin 32 desibelimilliwatin teholla 1,3 gigahertsin taajuudella ja ympärisäteilevällä antennilla lähetetty signaali voidaan havaita ympärisäteilevällä antennilla kymmenen kilometrin päästä, mikäli vastaanottimen herkkyys on vähintään -83 desibelimilliwattia. Keskimäärin vastaavalla taajuusalueella markkinoilla olevien vastaanottimien herkkyydeksi arvioidaan noin -93 desibelimilliwattia [30]. Vapaan tilan vaimennus pätee

nimensä mukaisesti vain vapaassa tilassa, eli se ei huomioi ilmakehän epäpuhtauksien vaimentavaa vaikutusta [25, s. 177]. Toisaalta ilmakehän ominaisuudet ja epäpuhtaudet vaimentavat signaalia merkittävästi vasta yli kolmen gigahertsin taajuuksilla [29]. Yhteys rajautuu lisäksi radiohorisonttiin R , jota kuvaa yhtälö

$$R = 4,1 \times \sqrt{h_1} + 4,1 \times \sqrt{h_2}, \quad (4)$$

missä R = lennokin ja maa-aseman välinen maksimietäisyys kilometreinä, h_1 = maa-aseman antennin korkeus metreinä ja h_2 = lennokin korkeus metreinä [25, s. 177]. Esimerkiksi jos maa-aseman antenni on kahden metrin korkeudella, ja halutaan kymmenen kilometrin yhteysväli, niin lennokin on oltava vähintään noin metrin korkeudella maanpinnasta. Radiohorisontti ei siis käytännössä rajoita lentävästä kohteesta lähetteen vastaanottamista näin lyhyillä etäisyyksillä.

Edellä todetun perusteella saatavilla on lähetin-vastaanotin-järjestelmiä, jotka pystyvät langattomaan tavallisen analogisen videokuvan siirtämiseen ainakin useiden kilometrien päähän. Käytännössä tällaisen analogisen COTS-linkkiyhteyden toimivuus taistelukentällä voi kuitenkin olla huono: käytössä oleva tekniikka ja sen ominaisuudet ja häirintään tarvittavat tiedot ovat helposti selvitettävissä. Päivänvalokamera ja videolähetin käyttävät molemmat komposiittivideota, mutta FLIR-kameran videon muoto jää epäselväksi.

4.5 Lennokin muut ja maa-aseman komponentit

Kartoitettujen lisäksi toimivaa lennokkijärjestelmää koottaessa on tullut esille hajanaisissa yhteyksissä muiden komponenttien tarve. Niitä ei ole kartoitettu tässä tutkimuksessa, mutta johtopäätöksiä tehtäessä on syytä muistaa niiden välttämättömyys käytännössä.

Maa-asemalla annetaan lennokille ohjauskomennot ja vastaanotetaan ja analysoidaan tiedustelutieto. Siinä on vähintään lukujen 4.3 ja 4.4 mukaiset lähetin ja vastaanotin lennokin ja maa-aseman välistä tiedonsiirtoa varten. Autonomiseen toimintaan kykenevän lennokkijärjestelmän maa-asemaan voi kuulua tietokone, jonka kautta lennokille annetaan ohjauskomennot ja mahdollisesti vastaanotetaan kerätty tieto. Reaaliaikaista tiedustelutiedon tarkastelua varten voi olla käytännöllisempää käyttää erillistä näyttöä. Muita komponentteja ovat virtalähde maa-aseman komponenteille ja lennokin akkujen latauslaite, käsiohjauslaitteisto sekä lähetin- ja vastaanotinantennit, jotka sijoitetaan maa-aseman ulkopuolelle mastoon parhaan yhteyden saavuttamiseksi.

5 KOELENTO

5.1 Yleistä

Koelennon tarkoituksena oli kokeilla käytännössä kaupallisista osista kootulla lennokilla saavutettavaa lentoaikaa, -matkaa ja -vauhtia sekä selvittää lennokin ilmaan saattamiseen tarvittavia toimenpiteitä. Koe suoritettiin Lanyu FPV Raptor TW 757 -lennokilla, johon oli asennettu lennon taltiointia varten RD32II-videokamera sekä GPS-tietojen tallentamista varten Sports Tracking Technologies Ltd:n Sports Tracker -sovelluksella varustettu Nokia C6-01 -matkapuhelin. Matkapuhelimen 131 gramman suuruisella massalla simuloitiin samalla koejärjestelystä puuttuvien, mutta taktisessa tiedustelulennokissa tarvittavien autopilottijärjestelmän, videolähettimen sekä videolähettimen akun massaa. Konetta ohjattiin maasta näköyhteydellä E_sky ET4 -radiokauko-ohjaimella. Hallintaa varten lennokkiin oli asennettu E_sky EK2-0426 -vastaanotin sekä Hobby King 401B -gyro vastaanottimen ja kallistussiivekeservojen välille vakauttamaan lennokin heilahtelua pituusakselinsa ympäri. Lennokin massaksi mitattiin ennen lentoonlähtöä jousivaa'alla 1780 grammaa.

Akkuina oli kaksi kappaletta Turnigy-merkkisiä 2200 milliampeeritunnin litiumpolymeeriakkuja rinnan kytkettyinä, näin saavutettiin 4400 milliampeeritunnin yhteiskapasiteetti. Akkujen massa oli 420 grammaa. Yhdessä akussa on kolme kappaletta sarjaan kytkettyjä nimellisjännitteeltään 3,7 voltin kennoja, tällöin akun nimellisjännite on 11,1 voltia. Ennen koetta akkuja oli käytetty puolen vuoden aikana noin 15 lataus-purku -syklin verran. Akkuja oli ladattu siten, että kokeen alkaessa jokaisen kennon jännitteeksi mitattiin 4,2 voltia, molempien akkujen jännite oli näin 12,6 voltia. Akut kestävät jatkuvana enintään 66 ampeerin virralla kuormittamisen [46]. Käytössä oli laskennallisesti 48,84 wattituntia sähköenergiaa (nimellisjännitteen ja -kapasiteetin tulo). Akkuja ei saatu sijoitettua aivan optimaalisesti, ja lennokin painopiste jäi tarpeettoman eteen.

Lennokin moottorin suurinta virrankulutusta vakiopotkurin kanssa ei ollut mahdollista mitata, mutta alkuperäinen 30 ampeerin jatkuvaa kuormitusta kestäväksi ilmoitettu moottorin nopeudensäädin viittaa korkeintaan noin 30 ampeerin suuruiseen maksimivirrankulutukseen. Moottorin ja nopeudensäätimen massa yhteensä oli noin 160 grammaa, eli koko voimalinjan massa noin 580 grammaa.

Lennokkia oli modifioitu siten, että alkuperäisen nopeudensäätimen tilalle oli vaihdettu AMIG A000240 -nopeudensäädin, joka pystyy jatkuvaan 40 ampeerin virransyöttöön moottorille ja

on varustettu akkuja suojaavalla ominaisuudella, joka rajoittaa moottorin tehoa merkittävästi, kun akkujännite laskee alle 9,3 voltin [2]. Kaikki neljä alkuperäistä servoa oli vaihdettu digitaalisiin E_sky EK2-0508 -servoihin niiden suuremman nopeuden vuoksi, minkä oletettiin tehostavan gyron toimintaa. Siivekkeet ja peräsin oli saranoitu 2,5 millimetriä paksuilla ja 43 millimetriä pitkillä muovisilla tappisaranoilla siten, että molemmissa siivekkeissä on neljä saranaa ja sivuperäsimessä kolme saranaa. Alun perin saranointi oli yksinkertaisesti puristettu siipien ja peräsimen materiaalina käytettyyn EPO-vaahtoon, mutta ratkaisu oli jäykkä eikä kestänyt mekaanista rasitusta.

Kokeen aikana esiintyi kevyttä tihkusadetta ja sää oli pilvinen. Lähin käytettävissä oleva sääasema oli noin 18 kilometrin päässä Utin lentokentällä, jossa havaittiin kokeen aikana lämpötilaksi kuusi celsius-astetta ja tuulen nopeudeksi yksi metri sekunnissa.



Kuva 5: Koelennolla käytetty FPV Raptor TW 757 kokeessa käytetyillä komponenteilla varustettuna, pois lukien peräsimen etupuolessa näkyvä antennin ja lähettimen yhdistelmä, joka on lisätty myöhemmin

5.2 Tulokset

Koe toteutettiin lentämällä suurpiirteistä ympyränmuotoista rataa aluksi matalammalla ja noin 15 minuutin lennon jälkeen korkeammalla lentoradalla. Lentoonlähtö tapahtui kädestä heittämällä ja palautus laskeutumalla pellolle. GPS-tallenteen mukaan lennokka kulki 25,9 kilometrin matkan noin 43 kilometrin keskituntivauhtia, johon ei sisälly ensimmäisten ja viimeisten

kahden kilometrin aikainen vauhti. Graafisessa esityksessä näkyy, että ensimmäisten ja viimeisten kahden kilometrin matkalla keskivauhti on muuta lentoa alhaisempi. Tämä johtuu siitä, että teknisesti ei ollut mahdollista rajata tallenteen aloitus- ja lopetushetkeä lennon aloitus- ja lopetushetken kanssa samanaikaisiksi, ja siksi tallennus on jatkunut myös lennokin ollessa paikallaan lennon alku- ja loppuvaiheissa. Korkeustallenteesta saadun kuvaajan muoto noudattaa pääpiirteissään visuaalista havaintoa.. Lennon tallennus kuitenkin aloitettiin ja päätettiin samassa paikassa, kartan [24] mukaan hieman yli 35 metrin korkeudella merenpinnasta. GPS-tallenteen mukaan korkeus oli alussa 53 metriä ja lopussa 118 metriä merenpinnasta, joten siinä esiintyy selkeää epätarkkuutta. Korkeus- ja vauhtitaltiointi on esitelty graafisesti liitteessä 2.

Kokoonpanolla saavutettiin hieman yli 35 minuutin lentoaika ennen kuin nopeudensäätimen 9,3 voltin kohdalla aktivoituva akun alhaisen jännitteen suojaus alkoi rajoittaa moottorille syötettävää virtaa. Tämän jälkeen toteutettiin hallittu laskeutuminen noin minuutin aikana. Akkujen jännitteet kokeen päättyttyä olivat kuormittamattomina 10,07 ja 10,10 voltia ja kennojännitteet 3,30, 3,30, 3,38, 3,38, 3,38 ja 3,42 voltia.

Jos oletetaan, että akkujen koko valmistajan ilmoittama kapasiteetti (48,84 wattituntia) käytettiin 35 minuutin aikana, saadaan laskettua, että moottorin keskimääräinen ottoteho kokeen aikana oli noin 84 wattia. Edelleen laskennallinen keskimääräinen virrankulutus 11,1 voltin nimellisjännitteellä oli noin 7,6 ampeeria.

Lennon aikana tihkusade ei häirinnyt lennätystä maassa, mutta lentokorkeudella vesipisaroita kuitenkin oli niin paljon, että lennon taltiointiin käytetyn kameran linssiin ilmestyi lähes heti lennon alussa vesipisaroita. Tämän seurauksena koelennon aikana ei saatu lainkaan tiedustelukäyttöön soveltuvaa kuvamateriaalia. Kamera oli asennettu kuvan 5 mukaiseen asentoon.

6 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Taktisen tiedustelulennokkijärjestelmän vaatimuksiksi osoittautuivat riittävä koko vakauden saavuttamiseksi, helppo kuljetettavuus sekä käyttö ilman operaattorin lennätystaitoa. Lentoon lähetys toteutettaisiin mieluiten heittämällä ja palautus laskuvarjon varassa. Teknisiä suorituskykyvaatimuksia ovat noin tunnin toiminta-aika, lennokin noin 60 kilometrin tuntivauhti sekä noin kymmenen kilometrin toimintasäde, mikä ei kuitenkaan toteudu kaikissa referenssijärjestelmissä. Lennokin on kyettävä tuottamaan yksinkertaista, mieluiten paikkatiedollista kuvamateriaalia, jota voidaan hyödyntää päätöksentekoprosessissa.

Valaistusolosuhteiden todettiin rajoittavan pelkällä päivänvalokameralla varustetun lennokin käyttökelpoisuutta noin 50–60 % vuoden keskimääräisestä vuorokaudesta. Vastaavasti täysin pimeässäkin käyttökelpoista sensoria tarvitaan varmuudella noin 40 % vuodesta, tosin tällöin kuun valoa ei ole lainkaan huomioitu. Keskimääräisten ulkolämpötilojen todettiin riippuvan selvästi tarkasteltavasta alueesta. Todettiin, että ollakseen käyttökelpoinen vähintään 70 % vuodesta, Sodankylässä laitteen on toimittava vielä noin -10 celsiusasteen lämpötilassa, kun Jyväskylässä riittää noin -5 celsiusasteen ja Helsingissä noin -1 celsiusasteen alin toimintalämpötila. Vastaavat lukemat 90 % käytettävyydellä ovat Sodankylässä noin -24 celsiusastetta, Jyväskylässä -16 celsiusastetta ja Helsingissä -9 celsiusastetta.

Lennokkijärjestelmään on kuuluttava tuhoutumisriskin vuoksi useita lennokeita, ja sensoriksi on pystyttävä vaihtamaan tiedustelutehtävän mukaan mahdollisimman edullinen, mutta riittävä sensori. Tällaista lukumäärällä hankittavaa ”taistelunkestävyyttä” voitaisiin saavuttaa erityisesti edullisilla COTS-ratkaisuilla. Lennokkijärjestelmän tiedonsiirtojärjestelmiin kohdistuu lisäksi elektronisen tiedustelun ja vaikuttamisen uhka.

Referenssijärjestelmien ilmoitetut suorituskyvyt täyttävät aikaisemmassa tutkimuksessa asetetut vaatimukset vaihtelevasti. Yhdellekään tarkastellulle järjestelmälle ei löytynyt käyttölämpötilarajoja. Olemassa olevien MOTS-järjestelmien elektronista taistelunkestävyyttä ei voida julkisessa työssä käsitellä. Yhteistä kaikille on lennokin sähkökäyttöisyys. Aeronautics Orbiter II edustaa järjestelmien suorituskykyisintä esimerkkiä ja ylittää dokumentoitujen ominaisuuksien osalta kaikki esille tulleet vaatimukset: sen toiminta-aika on neljä tuntia, toimintaetäisyys 30 kilometriä ja se on varustettu vakautetuilla ja optisesti suurentavilla päivänvalo- ja pimeänäkökameroilla. Se on melko suurikokoinen: sen massa on noin 9,5 kilogrammaa, siiven kärkiväli kolme metriä ja sen laukaisemiseen tarvitaan lihasvoimalla toimiva katapultti.

Patria MASS edustaa suorituskyyvyltään otoksen keskivertoa. Se täyttää asetetut suorituskyyvyvaatimukset ja osin myös ylittää ne: lennokin toiminta-aika on 60–75 minuuttia, optimilento-vauhti 60 kilometriä tunnissa ja toimintaetäisyys 10–20 kilometriä. Ulkomitoiltaan se on selvästi pienempi, kuin Orbiter II: massa toimintakunnossa on noin 3,5 kilogrammaa ja siipien kärkiväli 1,5 metriä.

AeroVironment RQ-14 Dragon Eye on esimerkkijärjestelmistä pienin ja myös suorituskyyvyltään heikoin lennokka. Sen yhtäjaksoinen toiminta-aika on 45 minuuttia ja -etäisyys alle viisi kilometriä, joten se ei niiltä osin täytä asetettuja vaatimuksia. Toisaalta se on ollut operatiivisessa käytössä Yhdysvaltain merijalkaväellä vuodesta 2003 alkaen, eikä operatiivisen käytön lopettamisesta löytynyt viitettä. Dragon Eye on ainoa järjestelmä, jonka hankintakustannuksista oli saatavilla tietoa yhtä järjestelmää kohden: vuonna 2006 arviolta noin 120 000 euroa.

Energialähteen käsittelyä varten kartoitettiin kahden akun, sähkömoottorin ja niille soveltuvan nopeudensäätimen, sekä kolmen polttomoottorin suoritusarvot. Kartoituksen ja luvussa 5 dokumentoidulta koelennolta kerätyn tiedon perusteella muodostettujen laskelmien pohjalta todettiin sähkömoottorikäyttöinen COTS-komponenteista koottu lennokka polttomoottorikäyttöistä kevyemmäksi lyhyellä toiminta-ajalla, eikä polttomoottorin kanssa tarvittavia komponentteja tutkittu tätä enempää. Tunnin toiminta-ajan saavuttamiseksi sähkömoottorin energiantarpeeksi arvioitiin kartoitettua aineistoa ja koelennon mittaustietoja hyväksi käyttäen noin 74 wattituntia ja tarvittavan akkukapasiteetin hinnaksi noin 45 euroa. Koko voimalinjan hinnaksi muodostui 70–90 euroa ja massaksi 770 grammaa.

Sähkömoottorille sopivia lennokkirunkoja kartoitettiin kolme kappaletta, minkä perusteella todettiin, että markkinoilla on referenssijärjestelmien lennokeiden kokoon verrattuna UAV-käyttöön soveltuvia lennokkirunkoja. Kuljetettavuus ja kokoonpantavuus taistelukentän olosuhteissa jäivät kuitenkin käytettävän aineiston perusteella epäselviksi. Kartoitettujen runkojen korkein veroton hinta on 160 euroa ja matalin 60 euroa. Hintojen keskiarvo on 111 euroa. Siipien kärkiväli on keskimäärin 1,85 metriä ja kärkivälin vaihteluväli, eli suurimman ja pienimmän kärkivälin erotus 52 senttimetriä. Vain yhdelle rungolle oli ilmoitettu kuormankantokyky, joka oli 1–2 kilogrammaa. Tunnin toiminta-aikaan tarvittavan voimalinjan 770 graman massan jälkeen voidaan sensoreita ja muita laitteita kuormata kyseiseen runkoon 230–1230 grammaa. Kaikki kartoitetut rungot on valmistettu osittain tai kokonaan paisutetusta muovista, joka on kevyttä ja sitkeää ja kestää itsessään vettä ja pakkasta, mutta ei välttämättä suojaa rungon sisälle asennettavaa elektroniikkaa.

Lennokin ohjauskokonaisuus muodostuu kahdesta peräkkäisestä ja moniosaisesta servojärjestelmästä. Ensimmäinen servojärjestelmä on lennokin ohjausjärjestelmä, joka ohjaa siivekeservojen toimintaa ja jonka takaisinkytkentä syntyy lennokin paikkaa ja asentoa mittaavista, järjestelmään kuuluvista sensoreista. Jokainen lennokin ohjainpintoja ohjaava servo muodostaa oman pienemmän servojärjestelmänsä, joissa takaisinkytkentä syntyy servon käyttöakselin asematiedosta. Erillisistä komponenteista kootussa, toimivassa lennokissa servojärjestelmien mitattujen ja haluttujen arvojen välisten erotusten vahvistukset on säädettävä sopiviksi, jotta koko ohjausjärjestelmä vastaa mitatun ja halutun arvon välisen erotuksen kasvuun riittävän nopeasti, mutta ei jää värähtelemään liian suuren vahvistuksen takia. Tähän säätöprosessiin vaadittavan ammattitaidon ja resurssien arviointi käytettävissä olevan aineiston perusteella ei ole riittävällä luotettavuudella mahdollista.

Siivekeservoja kartoitettiin 22 kappaletta. Niiden keskimääräinen hinta on 28 euroa otoskeskihajonnalla 23 euroa ja massa 40 grammaa otoskeskihajonnalla 16 grammaa.

Markkinoilla olevia lennokin ohjausjärjestelmiä dokumentoidaan tässä tutkimuksessa kaksi kappaletta. Molempien ilmoitetaan pystyvän toisen luvun vaatimuksen mukaiseen autonomiseen, ennalta ohjelmoitujen reittipisteiden kautta lentämiseen järjestelmiin kuuluvan GPS-paikantimen signaalia hyväksi käyttäen. Ensimmäisen järjestelmän massa on 47 grammaa ja tehonkulutus noin 500 milliwattia. Jälkimmäisen järjestelmän vastaavia tietoja ei löytynyt, mutta kuvan perusteella sen ulkomitat ovat ensimmäisen järjestelmän kanssa samaa suuruusluokkaa, ja siten massakin todennäköisesti melko yhtenevä. Jälkimmäisen järjestelmän tiedoista löytyi viitteitä kameragimbaalin eli -telineen vakauttamiskyvystä – tämä stabilointiominaisuus on monissa MOTS-lennokeissa.

Liitteen 1 perusteella todetaan, että tunnin toiminta-aika 500 milliwatin teholla lisää noin 4 grammaa tarvittavaa akkumassaa, ja hintaa alle euron. Ensimmäisen järjestelmän ilmoitettu alin käyttölämpötila on -25 celsiusastetta, joka riittää vielä Sodankylässä yli 90 % käytettävyyteen ympäri vuoden. Ohjausjärjestelmien verottomat hinnat ovat noin 230 ja 150 euroa.

Tutkimukseen valittu päivänvalokamera tallentaa korkeintaan 1920 x 1080 pisteen teräväpiirtovideota muistikortille, ja samanaikaisesti videon saa siirrettyä laitteesta HDMI- tai komposiittivideokaapelilla. Laitteen massa on 86 grammaa ja se pystyy tallentamaan videota sisäänrakennetun akun energialla yhtäjaksoisesti 2,5 tuntia. Kotelointi sallii upotuksen veteen, mutta tiiveyden saavuttamiseksi videoulostuloliitäntöjä ei voida käyttää. Kameran veroton hinta on

noin 90 euroa. Ilmoitetuilla tiedoilla ei pystytty muodostamaan johtopäätöstä spatiaalisesta resoluutiosta tai Johnsonin kriteerin täyttymisasteesta. Kameraa käytettiin luvun viisi koelennon taltioimiseen, mutta lennon aikana ei saatu käyttökelpoista videomateriaalia, koska kameran linssi peittyi vesipisaroista.

FLIR-kamera vaatii ulkoisen virtalähteen, eikä siinä ole sisäänrakennettua tallennusominaisuutta. Sen kennon resoluutio on 324 x 256 pistettä ja spatiaalinen resoluutio 2 milliradiaania. Laitteessa on videoulostulo BNC-liittimellä. FLIR-kameran alin käyttölämpötila on -40 celsiusastetta, joten se on toisen luvun lämpötilavaatimusten perusteella käyttökelpoinen koko maassa yli 90 % todennäköisyydellä. Laitteen massa on 360 grammaa, jota tunnin toiminta-aikaan tarvittava akku lisää vielä noin 50 grammaa. Veroton hinta on noin 2000 euroa, eli yli 22 kertaa päivänvalokameran hinta.

Videon langatonta siirtoa varten kartoitettiin yhden langattoman videonsiirtojärjestelmän ominaisuudet. Järjestelmän lähettimeen voidaan kytkeä komposiittivideolähde, kuten esimerkiksi kartoitettu päivänvalokamera. FLIR-kameran videomuodon yhteensopivuus langattoman lähettimen kanssa jäi epäselväksi.

Lähettimen lähetysteho on 1500 milliwattia 1,3 gigahertsin taajuudella, mikä vaatii vastaanottimelta vähintään -83 desibelimilliwatin herkkyyttä kymmenen kilometrin toimintaetäisyyden saavuttamiseksi ilman suuntaavia antennoja. Järjestelmän vastaanottimen herkkyyttä ei kuitenkaan ollut ilmoitettu, joten arvona käytettiin muusta lähteestä peräisin olevaa arviota -93 desibelimilliwattia, mikä mahdollistaisi yhteyden. Todettiin vielä, etteivät ilmakehän epäpuhtaudet tai radiohorisontti todennäköisesti rajoita yhteyttä kyseessä olevalla taajuudella ja yhteysvälillä. Elektronista taistelunkestävyyttä ei pystytty toteamaan. Ilmoitettu -10 celsiusasteen alin käyttölämpötila riittää koko maassa vähintään 70 % käytettävyyteen. Järjestelmän hinta on noin 80 euroa, ja se lisää lennokin kokonaismassaa tunnin toiminta-aikaan tarvittavan akkukapasiteetin kanssa mutta ilman antennia noin 60 grammaa.

Koelennolla käytetyn lennokin toiminta-aika jäi 25 minuuttia tunnin vähimmäistoiminta-ajasta ja lentovauhti noin 20 kilometriä tunnissa 60 kilometrin vähimmäistuntivauhdista. Suorituskykyä arvioitaessa on kuitenkin syytä huomioida kokonaisuuden suunnitteluun ja testaamiseen käytettävissä olleet rajalliset aika ja resurssit. Tästä syystä esimerkiksi lennokin painopiste jäi tarpeettoman eteen, mitä korkeusperäsin joutui kompensoimaan negatiivisella nosto-

voimalla. Tämä saattoi aiheuttaa merkittävänkin osan lennokin etenemistä vastustavista voimista – yhtälön 2 mukaan vastustava voima kasvaa tuotettavan nostovoiman neliössä.

Radiolähettimen kantamaa ei testattu, mutta kuljettu 25,9 kilometrin matka olisi autonomisesti kuljettuna riittänyt lennokin käymiseen kymmenen kilometrin päässä laukaisupaikasta, toimimaan siellä seitsemän minuuttia ja palamaan takaisin lähtöpaikalle. Kokeessa käytetyt komponentit matkapuhelinta ja akkujen latauslaitetta lukuun ottamatta maksoivat yhteensä noin 320 euroa. Lennokista puuttui autonomiseen toimintaan tarvittava ohjausjärjestelmä sekä videokuvan langattomaan siirtoon tarvittava radiolinkki. Kartoituksen perusteella niiden lisääminen nostaa kokoonpanon hinnan noin 550–630 euroon. Matkapuhelimen 131 gramman massa riitti simuloimaan puuttuvien komponenttien massan, joka kartoituksen perusteella olisi ollut noin 110 grammaa tarvittavine akkuineen, joskin ilman videolähettimen antennia.

Kokeesta on vielä huomioitava, että 35 minuutin lentoaika saavutettiin yhteensä 580 grammaa painaneella voimalinjalla. Laaditun funktion (kuva 2 ja liite 1, ss. 9–13) perusteella tällä massalla olisi tullut saavuttaa noin 10 minuuttia pitempi toiminta-aika. Virheen pääasiallinen selitys on todennäköisesti se, että käytetyllä laskentatavalla lasketaan toiminta-ajan minuutin lisäyksestä aiheutuva massan lisäys käyttäen edellisen toiminta-aikaminuutin mahdollistavan massan mukaista tehonkulutusta. Virhe on pieni ensimmäisten toiminta-aikaminuuttien jälkeen, mutta kasvaa toiminta-ajan kasvaessa.

Tutkittujen komponenttien ja kokeessa käytetyn lennokin hinta autonomisen ohjausjärjestelmän ja langattoman videolinkin kanssakin jää murto-osaan RQ-14 Dragon Eye:n ilmoitetusta hinnasta. RQ-14 on kuitenkin kokonainen ja ennen kaikkea valmis järjestelmä, johon kuuluu muun muassa maa-asema, jota ei tässä tutkimuksessa ole huomioitu. Lisäksi on arvioitava, onko säästö tarkoituksenmukaista, jos COTS-lennokkia ei esimerkiksi saada tarvittaessa riittävän luotettavasti ilmaan, tai lennokin säätäminen vie resursseja komppanian päätehtävältä.

Jatkotutkimuksen tarpeeksi todetaan ainakin luvun 4 mukaisten komponenttien tarkempien vaatimusten määrittäminen komponenttikohtaisesti, sekä mahdollisten muiden komponenttien tarve. Markkinoilla olevien COTS-komponenttien kirjo on laaja, ja niiden ominaisuuksia on listattu vaihtelevasti. Todellisten ominaisuuksien selvittäminen vaatii todennäköisesti käytännön testaamista. Tulevilla koelentoilla tulee selvittää, onko autonomiseen toimintaan ja reaaliaikaiseen kuvanvälitykseen kykenevä lennokka käytännössä toteutettavissa lukujen 4.3 ja 4.4 mukaiset ohjausjärjestelmä ja videolinkki lisäämällä.

LÄHTEET

- [1] *10GX 10cc (.60 cu. in.) Gas Engine by Evolution Engines. (EVOE10GX)* [Viitattu 16.3.2013] Saatavissa: <http://www.horizonhobby.com/products/10cc-60-cu-in-gas-engine-EVOE10GX#t2>
- [2] *A000240 Brushless motor ESC 40.* [Viitattu 6.12.2012] Saatavissa: <http://www.leluja.net/a000240-brushless-motor-p-1947.html>
- [3] *Aeronautics ltd.* [Viitattu 18.3.2013] Saatavissa: http://www.aeronautics-sys.com/aeronautics_company_profile
- [4] *American Council for an Energy-Efficient Economy - Motors.* [Viitattu 5.3.2013] Saatavissa: <http://www.aceee.org/topics/motors>
- [5] *APM 2.5+ Assembled Set (Top entry)* [Viitattu 06.03.2013] Saatavissa: http://store.diydrones.com/APM_2_5_Assembled_p/br-apmpwrkt.htm
- [6] *APM_v25.* [Viitattu 06.03.2013] Saatavissa: http://stuff.storediydrones.com/APM_v25.pdf
- [7] *ArduPilot Mega* [Viitattu 29.12.2012] Saatavissa: <http://www.ardupilot.co.uk/>
- [8] *BEV 1.3G 1500mW.* [Viitattu 29.12.2012] Saatavissa: http://www.bevrc.com/bev-13g-1500mw_p82.html
- [9] *Black X8 Wing.* [Viitattu 15.11.2012] Saatavissa: www.fpvflying.com/products/Black-X8-Wing.html
- [10] *Briefing: COTS conundrum.* London: Jane's Defence Weekly, 2012. Posted 20.1.2012 [Viitattu 18.3.2013].

- [11] *Expanded Polypropylene*. [Viitattu 15.11.2012] Saatavissa: www.styro-products-gympie.com.au/styro-products-expanded-polypropylene.html

- [12] FLIR PathFindIR 30-Hertz NightVision Thermal NTSC Camera for Car / Auto Product Info*PathFindIR LE*. [Viitattu 19.03.2013] Saatavissa: <http://www.opticsplanet.com/flir-pathfindir-30-hertz-nightvision-thermal-ntsc-camera.html>

- [13] Fonselius, J., Rinkinen, J., Vilenius, M. *Servotekniikka*, Helsinki: Oy Edita Ab, 1997. 194 s. ISBN 951-719-472-2

- [14] *FPVRaptor 1.6M TW 757*. [Viitattu 15.11.2012] Saatavissa: www.lanyuhobby.com/viewProduct_en.asp?flowNo=366

- [15] *FPVRaptor Composite 1600mm (PNF)*. [Viitattu 15.11.2012] Saatavissa: http://hobbyking.com/hobbyking/store/__18764__FPVRaptor_Composite_1600mm_PNF_.html

- [16] *Free-space path loss*. [Viitattu 27.3.2013] Saatavissa: http://en.wikipedia.org/wiki/Free-space_path_loss

- [17] *FY31AP autopilot system with Hornet OSD*. [Viitattu 29.12.2012] Saatavissa: <http://www.fpvflying.com/products/FY31AP-autopilot.html>

- [18] *FY-31AP Flight Stabilization System* [Viitattu 29.12.2012] Saatavissa: <http://www.feiyu-tech.com/product-en.php?id=23>

- [19] *Gasoline*. [Viitattu 16.3.2013] Saatavissa: <http://en.wikipedia.org/wiki/Gasoline>

- [20] *HobbyKing 40A BlueSeries Brushless Speed Controller*. [Viitattu 22.1.2013] Saatavissa: http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__11430__HobbyKing_40A_BlueSeries_Brushless_Speed_Controller.html

- [21] *HobbyKing 70A BlueSeries Brushless Speed Controller*. [Viitattu 22.1.2013] Saatavissa:
http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__24718__HobbyKing_70A_BlueSeries_Brushless_Speed_Controller.html
- [22] *How RC Servos Work* [Viitattu 13.3.2013] Saatavissa:
http://pcbheaven.com/wikipages/How_RC_Servos_Works/
- [23] Kananen, J. *Miehittämättömät ilma-alukset, niiden kehitys sekä käyttö viimeaikaisissa sodissa*. Pro Gradu -tutkielma. Helsinki, 2007. Maanpuolustuskorkeakoulu.
- [24] *Kansalaisen Karttapaikka*. [Viitattu 7.12.2012] Saatavissa:
<http://kansalaisen.karttapaikka.fi/linkki?scale=8000&text=Koepaikka&srs=EPSG%3A3067&y=6733831&x=501263&lang=fi>
- [25] Kosola, J & Solante, J. *Elektroninen sodankäynti, osa 1 – taistelun viides dimensio*. Helsinki: Edita Prima Oy, 2004. 223 s. ISBN 951-25-15554-7
- [26] Kärsämä, M. *Kaupallisten tuotteiden käyttö taistelukentän valvontajärjestelmänä*. EUK-tutkielma. Helsinki, 2011. Maanpuolustuskorkeakoulu.
- [27] Laine, S., Hoffren, J. & Renko K. *Lentokoneen aerodynamiikka ja lentomekaniikka*, 1. painos. Helsinki: WSOY Oppimateriaalit OY, 2006. 434 s. ISBN 951-0-31376-9
- [28] Lehto, M. & Varama, M. *Puolustusministeri Carl Haglundin haastattelu*. Sotilasaikakausilehti, 2013 Helmikuu 2. S. 11-12.
- [29] Lindell, I. *Raduaaltojen eteneminen*, 5. painos. Helsinki: Otatieto. Oy Yliopistokustannus University Press Finland Ltd. 2000. 257 s. ISBN 951-672-227-X
- [30] *Long Range* [Viitattu 10.3.2013] Saatavissa:
<http://www.digi.com/technology/rf-articles/long-range>

- [31] *Maavoimat hankkii minilennokkeja.* [Viitattu 12.5.2012] Saatavissa:
http://defmin.fi/?9_m=5002&9_o=40&s=8
- [32] *NGH GT9 9cc Gas Engine With Rcexl CDI Ignition.* [Viitattu 22.1.2013] Saatavissa:
http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__28238__NGH_GT9_9cc_Gas_Engine_With_Rcexl_CDI_Ignition.html
- [33] *NTM Prop Drive Series 35-36A 910Kv / 350W.* [Viitattu 22.1.2013] Saatavissa:
http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__14847__NTM_Prop_Drive_Series_35_36A_910Kv_350W.html
- [34] *NTM Prop Drive Series 35-48A 1100kv / 640w.* [Viitattu 22.1.2013] Saatavissa:
http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__16232__NTM_Prop_Drive_Series_35_48A_1100kv_640w.html
- [35] *Orbiter® – Family of Mini UAV's.* [Viitattu 26.3.2013] Saatavissa:
[http://www.aeronautics-sys.com/_Uploads/dbsAttachedFiles/Orbiter\(3\).pdf](http://www.aeronautics-sys.com/_Uploads/dbsAttachedFiles/Orbiter(3).pdf)
- [36] Pajula, J. *Komppaniatason tiedustelulennokin rakenne ja vaatimukset.* SK-tutkielma. Helsinki, 2009. Maanpuolustuskorkeakoulu.
- [37] *Patria Modular Airborne Sensor System.* [Viitattu 26.3.2013] Saatavissa:
http://www.patria.fi/fa2e2b004fc0a23ab1ebb7280c5127e4/Mini_UAV+-esite.pdf
- [38] *Popular Servos (25).* [Viitattu 19.3.2013] Saatavissa:
<http://www.servodatabase.com/>
- [39] *RCG 15cc Gas engine w/ CD-Ignition 2.1HP/1.54kw.* [Viitattu 22.1.2013] Saatavissa: http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__15380__RCG_15cc_Gas_engine_w_CD_Ignition_2_1HP_1_54kw.html

- [40] *RD32II 1080P Mini Sports DV 5.0MP CMOS Water Resistant Camera Camcorder with TF / 2 LEDs / Red Laser.* [Viitattu 29.12.2012] Saatavissa: <http://dx.com/p/hd-1080p-mini-sports-dv-5-0mp-cmos-water-resistant-camera-camcorder-with-tf-2-leds-1-red-laser-119415>

- [41] *RD32II Full HD Waterproof Spot Cam.* [Viitattu 19.3.2013] Saatavissa: http://www.hkredleaf.com/product_show.asp?id=1&classid=48

- [42] *Servo (radio control).* [Viitattu 13.3.2013] Saatavissa: [http://en.wikipedia.org/wiki/Servo_\(radio_control\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Servo_(radio_control))

- [43] *Skywalker platform for UAV FPV.* [Viitattu 15.11.2012] Saatavissa: <http://www.fpvflying.com/products/Skywalker-platform-for-UAV-FPV.html>

- [44] *Thermal Imaging.* [Viitattu 18.3.2013] Saatavissa: <http://www.nvl.army.mil/thermal.html>

- [45] *Tiedustelu.* [Viitattu 13.3.2013] Puolustusvoimien asianhallintajärjestelmä, määritelmärekisteri.

- [46] *Turnigy 2200mAh 3S 30C Lipo Pack.* [Viitattu 6.12.2012] Saatavissa: http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/uh_viewItem.asp?idProduct=9394

- [47] *Turnigy nano-tech 2200mah 3S 35~70C Lipo Pack.* [Viitattu 22.1.2013] Saatavissa: http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__11944__Turnigy_nano_tech_2200mah_3S_35_70C_Lipo_Pack.html

- [48] *Turnigy nano-tech 2200mah 4S 45~90C Lipo Pack.* [Viitattu 22.1.2013] Saatavissa: http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__11952__Turnigy_nano_tech_2200mah_4S_45_90C_Lipo_Pack.html

- [49] *UK studies low-cost anti-UAV missile.* London: Jane's Missiles and Rockets. Posted 15.6.2004 [Viitattu 18.3.2013].

- [50] *Understanding rc servos, digital, analog, coreless, brushless.* [Viitattu 13.3.2013] Saatavissa: <http://www.rchelicopterfun.com/rc-servos.html>
- [51] U.S. Government, Department of Defense, U.S. Military, Congressional Budget Office, Congressional Research Service. *2012 Review of Military Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and Unmanned Aerial Systems (UAS) Issues – Current and Future Plans for DOD Drones for Surveillance and Combat, Policy Options.* Progressive Management, 2012. 156 s. ASIN B007D92DN8
- [52] *V5.1 Skywalker FPV Airplane.* [Viitattu 15.11.2012] Saatavissa: <http://www.fpvhobby.com/24-168-cm-wingspan-airplane.html>

LIITELUETTELO

LIITE 1. Voimanlähdekartoitus ja voimanlähteiden vertailu.

LIITE 2. Koelennon aikainen GPS-tallenne.

Sähkökäyttöinen kokoonpano

Akku 1: Turnigy nano-tech 2200mah 4S 45~90C Lipo Pack



Kapasiteetti Ah	2,2 Ah
Nimellisjännite V	14,8 V
Kapasiteetti Wh	32,56 Wh
Massa g	257 g
Energiatiheys Wh / g	0,12669 Wh / g
Energian massa g / Wh	7,893 g / Wh
Hinta € (ilman veroja)	19,97 €
Hinta € ÷ kapasiteetti Wh	0,613 € / Wh
Massa g / (käyttöaika (min) ✕ ottoteho (W)) *)	0,13155 g / min _W

*) Ilmoittaa tarvittavan akkujen massan (0,13155 g ✕ käyttöaika (min) ✕ moottorin ottoteho (W)) grammoina

Turnigy nano-tech 2200mah 4S 45~90C Lipo Pack [Viitattu 22.1.2013] Saatavissa:
http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__11952__Turnigy_nano_tech_2200mah_4S_45_90C_Lipo_Pack.html

Akku 2: Turnigy nano-tech 2200mah 3S 35~70C Lipo Pack



Kapasiteetti Ah	2,2 Ah
Nimellisjännite V	11,1 V
Kapasiteetti Wh	24,42 Wh
Massa g	199 g
Energiatiheys Wh / g	0,122714 Wh / g
Energian massa g / Wh	8,149 g / Wh
Hinta € (ilman veroja)	15,17 €
Hinta € ÷ kapasiteetti Wh	0,621
Massa g / (käyttöaika (min) × ottoteho (W)) *)	0,13582 g / min _w

*) Ilmoittaa tarvittavan akkujen massan (0,13582 g × käyttöaika (min) × moottorin ottoteho (W)) grammoina

Turnigy nano-tech 2200mah 3S 35~70C Lipo Pack [Viitattu 22.1.2013] Saatavissa:
http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__11944__Turnigy_nano_tech_2200mah_3S_35_70C_Lipo_Pack.html

Moottori 1: NTM Prop Drive Series 35-48A 1100kv / 640w


Teho W ^{*)}	640 W
Laskennallinen suurin ottoteho (hyötysuhteella 85 %)	752,941 W
Massa g	173 g
Teho W ÷ massa g	3,699 W / g
Suurin virta A	70 A
Hinta € (ilman veroja)	17,39 €
Hinta € ÷ teho W	0,027 € / W

^{*)} Ei ilmoitettu, tarkoittaako otto- vai antotehoa.

NTM Prop Drive Series 35-48A 1100kv / 640w [Viitattu 22.1.2013] Saatavissa:

http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__16232__NTM_Prop_Drive_Series_35_48A_1100kv_640w.html

Moottori 2: NTM Prop Drive Series 35-36A 910kv / 350w



Teho W ^{*)}	350 W
Massa g	117 g
Teho W ÷ massa g	2,991 W / g
Suurin virta A	35 A
Hinta € (ilman veroja)	14,65 €
Hinta € ÷ Teho W	0,042 € / W

^{*)} Ei ilmoitettu, tarkoittaako otto- vai antotehoa.

NTM Prop Drive Series 35-36A 910Kv / 350W [Viitattu 22.1.2013] Saatavissa:
http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__14847__NTM_Prop_Drive_Series_35_36A_910Kv_350W.html

Nopeudensäädin 1: HobbyKing 70A BlueSeries Brushless Speed Controller

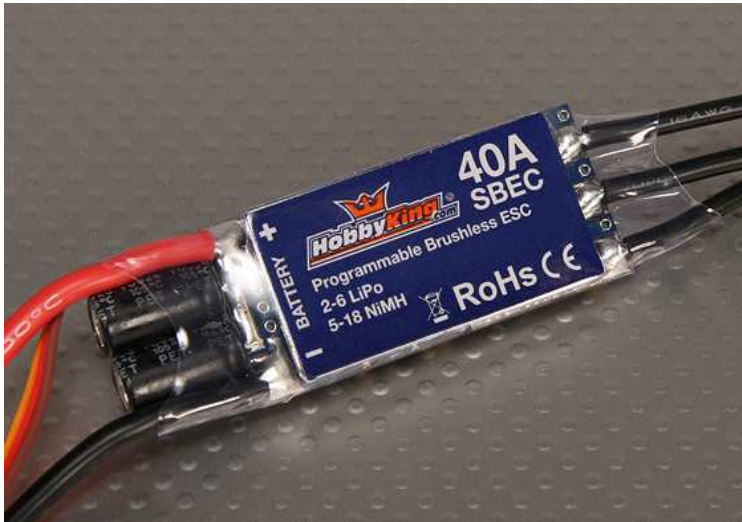


Virrankesto A	70 A
Massa g	53 g
Hinta € (ilman veroja)	25,14 €

Huomioita: virransyöttö ohjausliitintään 5,5 V / 4 A.

HobbyKing 70A BlueSeries Brushless Speed Controller [Viitattu 22.1.2013] Saatavissa:
http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__24718__HobbyKing_70A_BlueSeries_Brushless_Speed_Controller.html

Nopeudensäädin 2: HobbyKing 40A BlueSeries Brushless Speed Controller



Virrankesto A	40 A
Massa g	30 g
Hinta € (ilman veroja)	13,85 €

Huomioita: virransyöttö ohjausliitintään 5,5 V / 4 A.

HobbyKing 40A BlueSeries Brushless Speed Controller [Viitattu 22.1.2013] Saatavissa:
http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__11430__HobbyKing_40A_BlueSeries_Brushless_Speed_Controller.html

Järjestelmä 1.1 (akku 1, moottori 1 ja nopeudensäädin 1):

Akun, siirtolinjan ja moottorin häviöt huomioitu laskelmissa arvioimalla moottorin hyötysuhteeksi kerroin 0,85

Massa g	483 g
Massa ilman akkua g	226 g
Suurin teho W ^{*)}	640 W
Laskennallinen suurin ottoteho, $\eta=0,85$ (arvioitu)	752,941 W
Kapasiteetti Wh	32,56 Wh
Nimellisjännite	14,8 V
Toiminta-aika ^{**) min}	2,595 min
Toiminta-aika ^{**) min} ÷ massa g	$5,373 \times 10^{-3} \text{ min / g}$
Toiminta-aika ^{**) min} × suurin teho W	$1953,6 \text{ min}_w^{***})$
Hinta € (ilman veroja)	62,50 €
Hinta € ÷ toiminta-aika ^{**) min}	24,08 € / min
Hinta € ÷ (toiminta-aika ^{**) min} × suurin teho W)	$0,0320 \text{ € / min}_w^{***})$
Massa g / (lentominuutti / antoteho (W)) ($\eta=0,85$)	$226 \text{ g} + 0,1548 \text{ g / min}_w$

^{*)} Ei ilmoitettu, tarkoittaako otto- vai antotehoa. Käsitellään antotehona.

^{**) Maksimiteholla, 85 prosentin hyötysuhteella}

^{***)} Toiminta-aika (min) käytettyä tehoyksikköä (W) kohti

Järjestelmä 1.2 (akku 2, moottori 2 ja nopeudensäädin 2):

Akun, siirtolinjan ja moottorin häviöt huomioitu laskelmissa arvioimalla moottorin hyötysuhteeksi kerroin 0,85

Massa g	346 g
Massa g ilman akkua	147 g
Suurin teho W ^{*)}	350 W
Laskennallinen suurin ottoteho, $\eta=0,85$ (arvioitu)	411,765 W
Kapasiteetti Wh	24,42 Wh
Nimellisjännite	11,1 V
Toiminta-aika ^{**) min}	3,558 min
Toiminta-aika ^{**) min} ÷ massa g	$1,0284 \times 10^{-2} \text{ min / g}$
Toiminta-aika ^{**) min} × suurin teho W	$1465,1 \text{ min}_w^{***)}$
Hinta € (ilman veroja)	43,67 €
Hinta € ÷ toiminta-aika ^{**) min}	12,27 € / min
Hinta € ÷ (toiminta-aika ^{**) min} × suurin teho W)	$0,030 \text{ € / min}_w$
Massa g / (lentominuutti / antoteho (W)) ($\eta=0,85$)	$147 \text{ g} + 0,1598 \text{ g / min}_w$

^{*)} Ei ilmoitettu, tarkoittaako otto- vai antotehoa. Käsitellään antotehona.

^{**) Maksimiteholla, 85 prosentin hyötysuhteella}

^{***)} Toiminta-aika (min) käytettyä tehoyksikköä (W) kohti

Siiven nostovoimaa kuvaa yhtälö¹

$$L = C_L(\alpha) \frac{1}{2} \rho V^2 S, \quad (1)$$

missä L = nostovoima

C_L = nostovoimakerroin, joka riippuu mm. siiven kohtauskulmasta α

ρ = väliaineen tiheys

V = vauhti

S = siiven pinta-ala

Lennokin painoa kuvaa yhtälö¹

$$G = mg, \quad (2)$$

missä G = paino

m = massa

g = putoamiskiihtyvyyys

Mekaniikan III peruslain mukaan, jotta lennokka pysyy vaakalennossa muuttumattomalla korkeudella, on toteuduttava $L = G$ ¹.

Oletetaan, että nostovoiman L muutos toteutetaan vain vauhtia V muuttamalla, ja yhtälön 1 muut arvot pysyvät muuttumattomina. Kuvataan näitä symbolilla C_0 , jonka arvo on

$$C_0 = \frac{L_0}{V_0^2}, \quad (3)$$

missä C_0 = siiven ja väliaineen ominaisuuksista riippuva kerroin

L_0 = tunnettu nostovoima

V_0 = tunnettu vauhti

, jolloin saadaan yhtälöstä 1 ratkaistua nostovoiman L toteuttamiseksi vaadittava vauhti V_L

$$V_L = \sqrt{\frac{LV_0^2}{L_0}}, \quad (4)$$

missä V_L = tarvittu vauhti

L = haluttu nostovoima

V_0 = tunnettu vauhti nostovoiman L_0 saavuttamiseksi

L_0 = tunnettu nostovoima vauhdilla V_0

¹ Laine, S., Hoffren, J. & Renko K. *Lentokoneen aerodynamiikka ja lentomekaniikka*

Tiedetään, että teho on voiman ja vauhdin tulo on

$$P = Fv, \quad (5)$$

missä $P = \text{teho}$
 $F = \text{voima}$
 $v = \text{vauhti}$

Kun tunnetaan teho P , voidaan yhtälöstä 5 ratkaista tasaisella vauhdilla v liikkuvan lennokin etenemistä vastustava voima F

$$F_v = \frac{P_0}{v_0}, \quad (6)$$

missä $F_v = \text{voima}$
 $P_0 = \text{teho}$
 $v_0 = \text{vauhti}$

Lentokoneen etenemistä haittaava aerodynaaminen vastusvoima koostuu todellisuudessa useasta eri voimakomponentista. Keskimäärin noin 50 % siitä muodostuu kitkavoimasta, joka kasvaa likimain vauhdin neliössä. Käytetään tätä tietoa lennokin etenemistä haittaavan vastusvoiman muuttumisen arvioimiseksi nopeuden muuttumisen myötä:

$$F_v = V^2 C_v, \quad (7)$$

missä $F_v = \text{lennokin etenemistä vastustava voima}$
 $V = \text{lennokin vauhti}$
 $C_v = \text{ilman ja tietyn lennokin ominaisuuksista riippuva vakiokerroin}$

Ratkaistaan kerroin C_v

$$C_v = \frac{F_{v0}}{V_0^2}, \quad (8)$$

missä $C_v = \text{ilman ja tietyn lennokin ominaisuuksista riippuva vakiokerroin}$
 $F_{v0} = \text{tunnettu lennokin etenemistä vastustava voima}$
 $V_0 = \text{tunnettu lennokin vauhti}$

Sijoitetaan vielä yhtälö 6 F_{v0} :n tilalle:

$$C_v = \frac{P_0}{V_0^3}, \quad (9)$$

missä C_v = ilman ja tietyn lennokin ominaisuuksista riippuva vakiokerroin

P_0 = tunnettu tarvittu teho nopeudella V_0

V_0 = tunnettu saavutettu vauhti teholla P_0

Tällöin, kun sijoitetaan yhtälöön 8 yhtälö 9 saadaan lennokin aerodynaamista vastusta vauhdilla V_L kuvaava voima F_V

$$F_V = V_L^2 \frac{P_0}{V_0^3}, \quad (10)$$

missä F_V = lennokin etenemistä vastustava voima

V_L = lennokin vauhti nostovoiman L tuottamiseksi

F_{v0} = tunnetulla nopeudella lennokin etenemistä vastustava tunnettu voima

Sijoitetaan nyt yhtälöt 10 ja 4 yhtälöön 5 nostovoiman L saavuttamiseksi tarvittavan tehonkulutuksen arvioimiseksi:

$$P_L = \left(\sqrt{\frac{LV_0^2}{L_0}} \right)^2 \frac{P_0}{V_0^3} \sqrt{\frac{LV_0^2}{L_0}},$$

joka sievenee muotoon:

$$P_L = \frac{L\sqrt{LP_0}}{L_0\sqrt{L_0}}, \quad (11)$$

missä P_L = tarvittu teho nostovoiman L saavuttamiseksi

L = haluttu nostovoima

P_0 = tunnettu teho, jolla saavutetaan nostovoima L_0

L_0 = tunnettu nostovoima teholla P_0

Koelennolla saavutettiin 35 minuutin lentoaika 4400 milliampeeritunnin akkukapasiteetilla, jotka toimivat 11,1 voltin nimellisjännitteellä. Keskimääräinen tehonkulutus oli tästä laskettuna 84 wattia. Oletetaan hyötysuhteeksi $\eta=0,85$, tällöin moottorin antoteho (=lennokin tasaiseen vaakalentoa vaadittava teho) oli 71,4 wattia. Keskivauhti oli noin 12 metriä sekunnissa.

Voimalinjan (akut, moottori, nopeudensäädin) massaksi punnittiin jousivaa'alla 580 grammaa. Akkujen ympärille oli kierretty teippiä ja nopeudensäätimen kaikkia johtimia jatkettu noin 20 senttimetriä, näistä aiheutui ylimääräistä massaa, jota ei pystytty määrittelemään tarkasti. Akkujen osuus oli 420 grammaa. Lennokin massa oli 1780 grammaa, eli siiven tuottama nostovoima vaakalennossa oli kaavan 2 mukaan noin 17462 newtonia, kun $g = 9,81 \text{ m/s}^2$. Voimalinjan osuus koko lennokin 1780 gramman massasta oli 32,6 %.

Kartoitettujen sähköjärjestelmien (akusto, moottori, nopeudensäädin) laskennalliset massat 35 minuutin toiminta-ajalla samalla 71,4 watin antoteholla ja hyötysuhteella $\eta=0,85$ ovat 602 grammaa ja 534 grammaa. Näiden keskiarvo on 568 grammaa. Koekokoonpanon voimalinjan massa oli siis hieman keskiarvoa enemmän, mutta kuitenkin selvästi vähemmän, kuin tehokkaamman kartoitetun sähköjärjestelmän.

Nostovoiman yhtälön mukaisesti nostovoimaa voitaisiin lennokin tai siiven rakennetta tai väliainetta muuttamatta muuttaa muuttamalla lennokin vauhtia tai korkeusperäsimen avulla muuttamalla siiven kohtauskulmaa. Yksinkertaistuksen vuoksi oletetaan, että kaikki tarvittava lisänostovoima syntyy vauhtia lisäämällä ja tehonkulutus kasvaa näin kaavan 11 mukaisesti.

Käytetään lennokin tyhjämassana koelennokin tyhjämassaa $M_0 = 1,36$ kilogrammaa. Tällöin lennokin toiminta-aika on nolla minuuttia, koska akkuja ei ole ollenkaan. Akkujen 1 ja 2 keskiarvona saadaan, että yksi minuutti yhden watin teholla lisää akuston (ja koko lennokin) massaa noin 0,133685 grammaa eli 0,000133685 kilogrammaa. Moottorin ja siirtolinjan hyötysuhteeksi yhteensä oletetaan $\eta = 0,85$. Täten minuutin toiminta-aikaan kykenevän lennokin massa M_1 on

$$M_1 = M_0 + 0,000133685 \text{ kg} / W \times \frac{L\sqrt{LP_0}}{L_0\sqrt{L_0}} \eta$$

$$M_1 = 1,36 \text{ kg} + 0,000133685 \text{ kg} / W \times \frac{1,36 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \sqrt{1,36 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2} 71,4 \text{ W}}{1,78 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \sqrt{1,78 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2}}$$

$$M_1 \approx 1,367 \text{ kg}$$

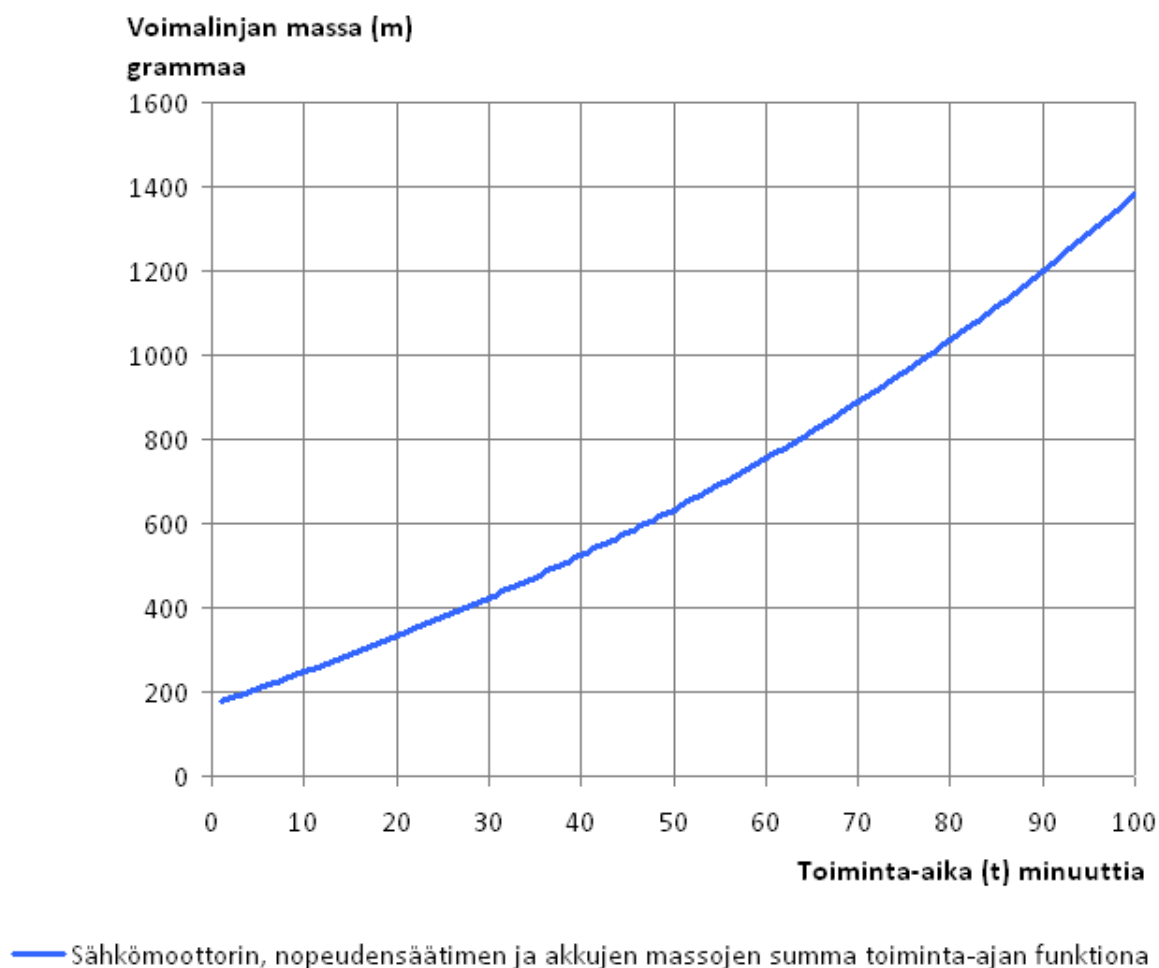
Jolloin tehonkulutus on yhtälön 11 mukaan 48,02 W

ja seuraavan minuutin mahdollistava lennokin massa M_2

$$M_2 = 1,367\text{kg} + 0,000133685\text{kg} / \text{W} \times \frac{1,367\text{kg} \times 9,81\text{m} / \text{s}^2 \sqrt{1,367\text{kg} \times 9,81\text{m} / \text{s}^2} 71,4\text{W}}{1,78\text{kg} \times 9,81\text{m} / \text{s}^2 \sqrt{1,78\text{kg} \times 9,81\text{m} / \text{s}^2}}$$

$$M_2 \approx 1,376 \text{ kg}$$

Näin ollen, kun ketjua jatketaan riittävän pitkälle, saadaan voimalinjan massan (akut, moottori, nopeudensäädin) kuvaaja toiminta-ajan funktiona:



Voimalinjan massa nollan minuutin toiminta-ajalla on kokoonpanojen 1.1 ja 1.2 moottorien ja nopeudensäätimien massojen summien keskiarvo, 178 grammaa.

Polttomoottorikäyttöinen kokoonpano

Moottori 1: RCG 15cc Gas engine w/ CD-Ignition 2,1HP/1,54kw



Iskutilavuus cm ³	15 cm ³
Teho hp	2,1 hp
Teho W	1540 W
Massa g (sis, pakoputken ja sytytysjärjestelmän)	825 g
Teho ÷ massa -suhde W / g	1,867 W / g
Hinta € (ilman veroja)	116,01 €
Hinta € ÷ Teho W	0,075 € / W

Huomioita: voidaan käyttää 2-tahtibensiiniä, jossa bensiiniä suhteessa öljyyn 25:1 - 40:1

RCG 15cc Gas engine w/ CD-Ignition 2.1HP/1.54kw [Viitattu 22.1.2013] Saatavissa:
http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__15380__RCG_15cc_Gas_engine_w_CD_Ignition_2_1HP_1_54kw.html

Moottori 2: NGH GT9 9cc Gas Engine With Rcexl CDI Ignition



Iskutilavuus cm ³	9 cm ³
Teho hp	0,8 hp
Laskettu teho W	597 W
Massa g (sis, pakoputken ja sytytysjärjestelmän)	545 g
Teho / massa -suhde W / g	1,095 W / g
Hinta € (ilman veroja)	102,26 €
Hinta € ÷ Teho W	0,171 € / W

Huomioita: voidaan käyttää 2-tahtibensiiniä, jossa bensiiniä suhteessa öljyyn 20:1 - 25:1

NGH GT9 9cc Gas Engine With Rcexl CDI Ignition [Viitattu 22.1.2013] Saatavissa:

http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__28238__NGH_GT9_9cc_Gas_Engine_With_Rcexl_CDI_Ignition.html

Moottori 3: Evolution Engines 10GX 10cc (.60 cu. in.) Gas Engine



Iskutilavuus cm ³	9,83 cm ³
Teho hp	1,68 hp
Laskettu teho W	1253 W
Massa g (sis. pakoputken ja sytytysjärjestelmän)	627 g
Teho / massa -suhde W / g	1,998 W / g
Hinta € (ilman veroja)	153,20 €
Hinta € ÷ Teho W	0,122 € / W
Polttoaineenkulutus g / min *)	8,596 g / min

Huomioita: voidaan käyttää 2-tahtibensiiniä, jossa bensiiniä suhteessa öljyyn 20:1.

10GX 10cc (.60 cu. in.) Gas Engine by Evolution Engines (EVOE10GX) [Viitattu 16.3.2013]

Saatavissa: <http://www.horizonhobby.com/products/10cc-60-cu-in-gas-engine-EVOE10GX#t2>

*) Jälleenmyyjän julkaisemalla videolla² ilmoitetusta keskimäärin saavutettavasta lentoajasta laskettu polttoaineenkulutus g / min (11 fl. oz. ✕ 29,57 (ml/fl. oz.) ✕ 0,74 (g/ml) ÷ 28 min.)

Tällöin, jos polttoaineenkulutus on 8,596 g / min, bensiinin energiasisältö 780 Wmin / g ja moottoria käytetään jatkuvasti täydellä teholla 1253 W, niin hyötysuhde $\eta = 0,1869$

³ Viitattu 17.3.2013, saatavilla: http://www.youtube.com/watch?feature=player_embedded&v=BwcTjVbXw_A#!

Bensiini

Tiheys g / ml	0,74 g / ml
Energiatiheys Wh / g	13 Wh / g
Energiatiheys Wmin / g	780 Wmin / g
Energian massa g / Wh	8×10^{-3} g / Wh
Massa g / (lentoaika (min) \times ottoteho (W)) ^{*)}	$1,3 \times 10^{-3}$ min _w

Gasoline [Viitattu 16.3.2013] Saatavissa: <http://en.wikipedia.org/wiki/Gasoline>

^{*)} Ilmoittaa tarvittavan bensiinimäärän massan ($1,3 \times 10^{-3}$ g \times käyttöaika (min) \times moottorin ottoteho (W)) grammoina

Järjestelmä 2.1

Teho W	1540 W
Laskennallinen tehonkulutus W, $\eta=0,19$	8105 W
Massa g / (lentoaika / teho (W))	$825 \text{ g} + 1,3 \times 10^{-3} \text{ min}_w$
Massa g / (lentoaika / antoteho (W)), $\eta=0,19$	$825 \text{ g} + 6,84 \times 10^{-3} \text{ min}_w$

Järjestelmä 2.2

Teho hp	0,8 hp
Laskettu teho W	597 W
Laskennallinen tehonkulutus W, $\eta=0,19$	3142 W
Massa g / (lentoaika / teho (W))	$545 \text{ g} + 1,3 \times 10^{-3} \text{ min}_w$
Massa g / (lentoaika / antoteho (W)), $\eta=0,19$	$545 \text{ g} + 6,84 \times 10^{-3} \text{ min}_w$

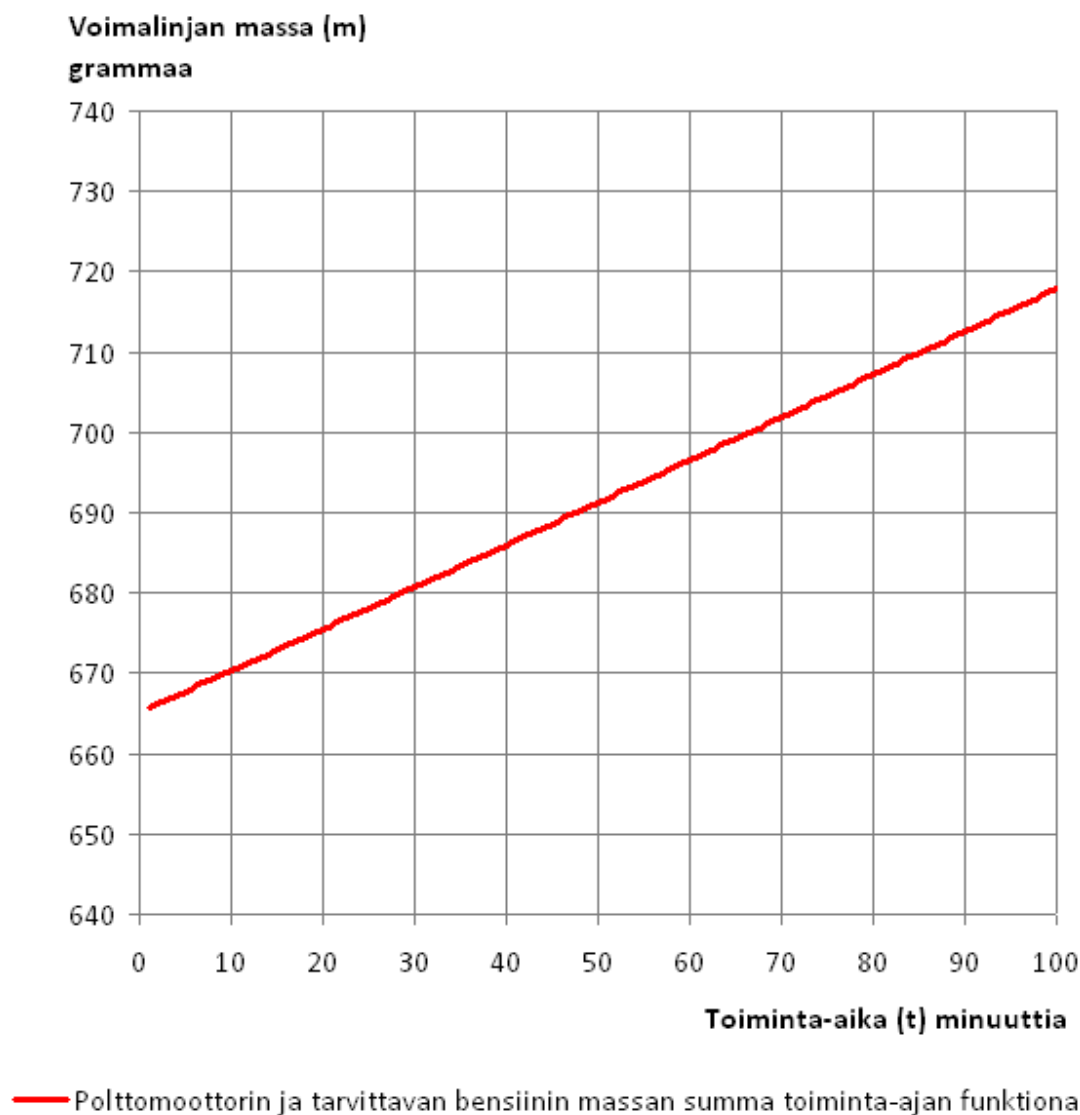
Järjestelmä 2.3

Teho hp	1,68 hp
Laskettu teho W	1253 W
Laskennallinen tehonkulutus W, $\eta=0,19$	6595 W
Massa g / (lentoaika / teho (W))	$627 \text{ g} + 1,3 \times 10^{-3} \text{ min}_w$
Massa g / (lentoaika / antoteho (W)), $\eta=0,19$	$627 \text{ g} + 6,84 \times 10^{-3} \text{ min}_w$

Käytetään nyt yhtälöä 11 bensiinikäyttöisen lennokin tehontarpeen arvioimiseksi. Lennokin tyhjämassana käytetään koelennokin tyhjämassaa 1,36 kilogrammaa, johon lisätään vielä polttomoottorien massojen keskiarvon ja sähkömoottorien ja nopeudensäätimien keskimääräisten massojen summan erotus. Tyhjämassaksi M_0 tulee 1,848 kilogrammaa. Tällöin lennokin toiminta-aika on nolla minuuttia, koska bensiiniä ei ole ollenkaan. Minuutin toiminta-aikaan yhden watin teholla tarvitaan bensiiniä $1,3 \times 10^{-3}$ grammaa eli $1,3 \times 10^{-6}$ kilogrammaa. Käytetään hyötysuhteena polttomoottorin 3 tietojen perusteella laskettua hyötysuhdetta $\eta=0,19$.

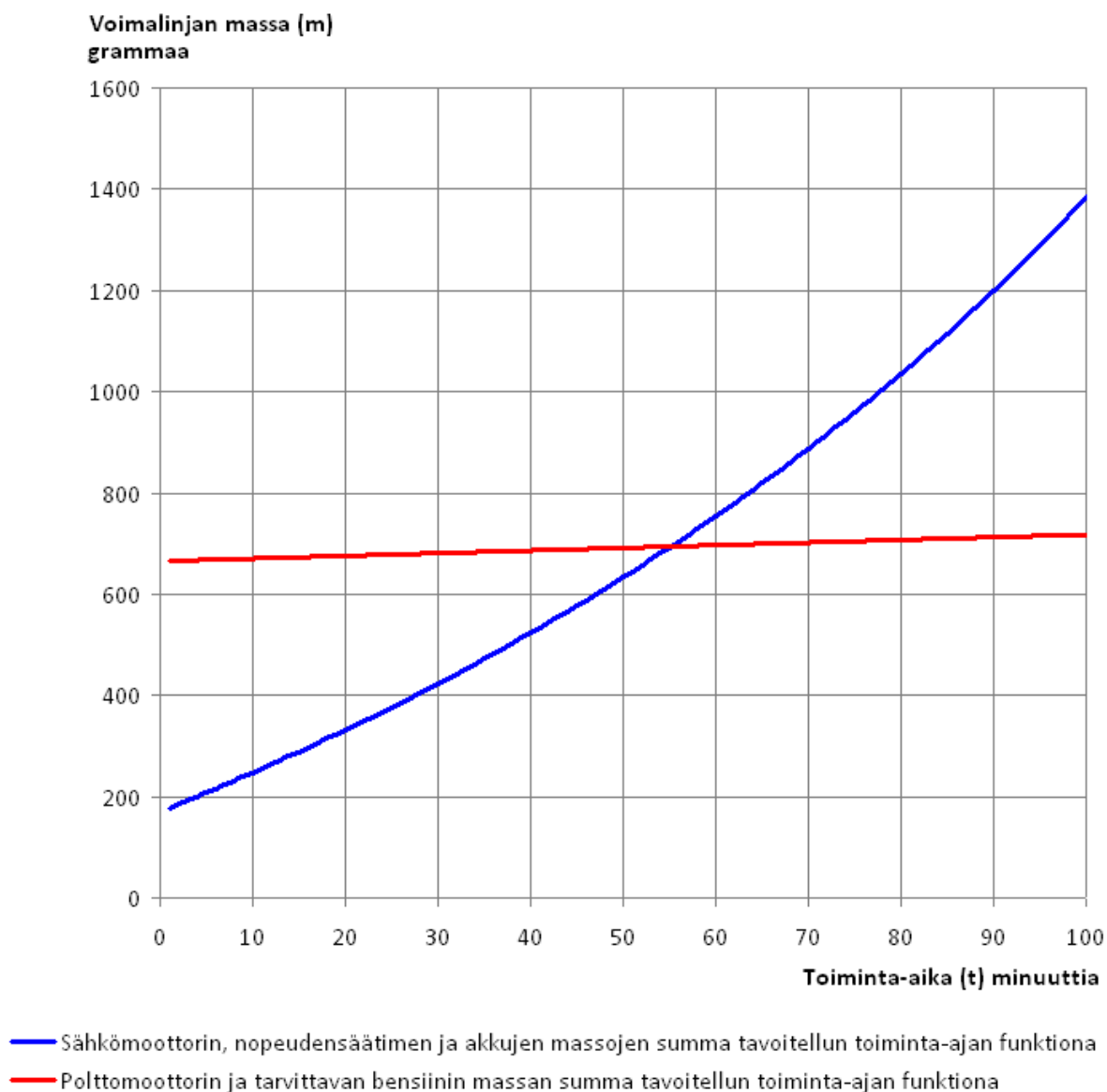
$$M_1 = M_0 + 1,3 \times 10^{-6} \text{ kg} / W \times \frac{L\sqrt{LP_0}}{L_0\sqrt{L_0}} \eta$$

Näin ollen, kun ketjua jatketaan kuten sivuilla 13–14 riittävän pitkälle, saadaan voimalinjan massan (polttomoottori, bensiini) kuvaaja toiminta-ajan funktiona:



Voimalinjan massa nollan minuutin toiminta-ajalla on polttomoottorien 1, 2 ja 3 massojen keskiarvo, 666 grammaa.

Tarkastellaan vielä sekä sähkö-, että polttomoottorikäyttöisten voimalinjojen massojen kuvaajia toiminta-ajan suhteen päällekkäin samalla asteikolla:



Havaitaan, että käytetyillä arvoilla sähkökäyttöinen voimalinja on kevyempi noin 55 minuutin toiminta-aikaan asti, koska itse sähkömoottori nopeudensäätiminen on polttomoottoria huomattavasti kevyempi. Yli tunnin toiminta-ajoilla polttomoottori on kevyempi, koska sen toiminta-ajan lisäämiseen tarvittava bensiini kasvattaa lentokoneen massaa ja siten energiantarvetta huomattavasti vähemmän, kuin vastaavan energiamäärän sisältävä akku.



Kuva: Koelennon aikainen GPS-tallenne. Luotu Sports Tracker -ohjelmalla.³

³ <http://www.sports-tracker.com>